

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

FERNANDO SCHMIDT

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE FIBRA DE VIDRO COMERCIAL
POR FIBRA DE VIDRO RESIDUAL EM PASTA GEOPOLIMÉRICA POROSA

Joinville

2021

FERNANDO SCHMIDT

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE FIBRA DE VIDRO COMERCIAL
POR FIBRA DE VIDRO RESIDUAL EM PASTA GEOPOLIMÉRICA POROSA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville

2021

FERNANDO SCHMIDT

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE FIBRA DE VIDRO COMERCIAL
POR FIBRA DE VIDRO RESIDUAL EM PASTA GEOPOLIMÉRICA POROSA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 23 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Senff
Orientador/Presidente

Profª. Dra. Derce Recouvreux
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina - CTJ

Profª. Dra. Helena Ravache Samy Pereira
Membra
Centro Universitário Católica de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por toda a proteção e bênçãos que me deu em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Gilberto e Rosane, por todo o incentivo, apoio e por todos os ensinamentos que puderam me passar, e ao meu irmão, Alexandre, por ter sido desde sempre meu melhor amigo.

À Thainá, minha namorada, que conheci nos períodos iniciais do curso e que em todas as horas me deu seu apoio, me fez feliz e nunca me deixou desistir.

Ao Professor Dr. Luciano, por todo o conhecimento compartilhado comigo, pela sua orientação valiosa e pelo seu comprometimento durante todo o trabalho.

À Universidade Católica de Joinville por ter cedido o espaço e o equipamento para a realização dos ensaios.

Aos meus colegas Wilson Schwitzky e Vinícius Krause por toda a ajuda.

À empresa Tecnofibras, pelo fornecimento das fibras de vidro residuais.

E finalmente, a todos os meus amigos e familiares que foram tão importantes durante toda minha jornada, de vida pessoal e acadêmica, até aqui.

RESUMO

Com a constante busca por materiais mais sustentáveis para a construção civil, o geopolímero vem ganhando espaço como uma alternativa em relação ao uso do cimento Portland. Isso se dá pela grande quantidade de CO₂ gerada na produção do cimento Portland, enquanto essas emissões são severamente reduzidas na produção de geopolímeros. Os geopolímeros são originados da reação alcalina entre materiais com composição predominante de alumina (Al₂O₃) e sílica (SiO₂), e endurecem através do fenômeno da geopolimerização. A principal fonte de aluminossilicatos utilizada na produção de geopolímeros é o Metacaulim. A solução alcalina composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio, com concentração de 10 molar, foi utilizada como ativador da reação. Com o intuito de garantir menor densidade ao material, e por consequência menor peso, adicionou-se à mistura o pó de alumínio, liberando gases que permitem a criação de poros. E para conferir mais resistência mecânica, principalmente à flexão, foi adicionada fibra de vidro. A fim de encontrar uma forma de reduzir o descarte de fibras de vidro, nesta pesquisa, a fibra de vidro comercial foi substituída, em diferentes teores (0%, 33%, 67% e 100%), por uma fibra de vidro residual, proveniente de descarte da indústria. Portanto, essa pesquisa teve como objetivo avaliar a influência dessa substituição na densidade aparente, porosidade aberta, absorção de água e resistência à flexão, no estado endurecido, aos 28 dias, de uma pasta geopolimérica porosa. Os resultados demonstraram que a substituição de fibra de vidro comercial por residual, teve a capacidade de diminuir a densidade em até 20% e aumentar a resistência à flexão em 47%, cerca de 0,50 MPa, em comparação a uma formulação sem fibras de vidro, ou manter os mesmos níveis em relação a formulações onde toda a fibra de vidro é comercial. Além do fato de ser uma alternativa mais sustentável, estes resultados tornam viável a substituição da fibra de vidro comercial por fibra de vidro residual em geopolímeros.

Palavras-chave: Geopolímero. Fibra de vidro. Metacaulim. Pó de alumínio.

ABSTRACT

With the constant search for more sustainable materials for civil construction, geopolymer has been gaining ground as an alternative to the use of Portland cement. This is due to the large amount of CO₂ generated in the production of Portland cement, while these emissions are severely reduced in the production of geopolymers. Geopolymers originate from the alkaline reaction between materials with a predominant composition of alumina (Al₂O₃) and silica (SiO₂), and harden due to the polymerization phenomenon. Metakaolin is the main source of aluminosilicates used in the production of geopolymers. The alkaline solution composed of sodium hydroxide and sodium silicate, with a concentration of 10 molar, was used as the reaction's activator. In order to ensure less density to the material, and therefore less weight, aluminum powder was added to the mixture, releasing gases that allow the creation of pores. And to provide more mechanical resistance, mainly flexural strength, glass fiber was added. In order to find a way to reduce the disposal of glass fibers, in this research this, the commercial glass fiber was replaced, at different levels (0%, 33%, 67% e 100%), by a residual glass fiber, coming from industrial disposal. Therefore, this research aimed to evaluate the influence of this substitution apparently density, open porosity, water absorption and flexural strength in the hardened state, at 28 days, of a porous geopolymer paste. The results exposed that replacing commercial glass fiber with residual fiber had the ability to decrease density by up to 20% and increase flexural strength by 47%, about 0.50 MPa, compared to a formulation without glass fiber, or maintain the same levels for formulations where all the glass fiber is commercial. In addition to being a more sustainable alternative, these results make it feasible to replace commercial glass fiber with residual glass fiber in geopolymers.

Keywords: Geopolymer. Glass fiber. Metakaolin. Aluminum powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos Polissialatos.....	15
Figura 2 - Aplicação de concreto geopolimérico em rodovias.....	17
Figura 3 - Avião Rafale, desenvolvido com moldes geopoliméricos.....	18
Figura 4 - Viga produzida em concreto geopolimérico.....	18
Figura 5 - Geopolímeros e Cimento Portland.....	19
Figura 6 - Geopolímeros x Cimento Portland.....	19
Figura 7 - Classificação dos tipos de fibra de vidro.....	22
Figura 8 - Materiais utilizados: a) Metacaulim; b) Pó de alumínio; c) Fibra de vidro; d) NaOH 10 M; e) Na_2SiO_3	25
Figura 9 - Distribuição do tamanho de partículas do metacaulim.....	27
Figura 10 - Difração de raios-X do metacaulim.....	27
Figura 11 - a) Distribuição granulométrica do pó de alumínio; b) Amostra de pó de alumínio.	29
Figura 12 - Retalho de manta de fibra de vidro.....	29
Figura 13 - Guilhotina de papel.....	30
Figura 14 - Fluxograma de produção de pasta geopolimérica.....	32
Figura 15 - Equipamentos utilizados para a produção dos corpos de prova: a) molde, b) misturador mecânico, c) balança de precisão.	32
Figura 16 - a) Pasta em processo de cura no molde, b) Corpo de prova em pasta geopolimérica porosa.....	33
Figura 17 - a) Máquina de Ensaio Mecânicos, b) Dispositivo de Ensaio de Flexão.....	34
Figura 18 - Estufa onde os corpos de prova foram acondicionados.....	35
Figura 19 - Corpos de prova em pasta geopolimérica porosa.....	36
Figura 20 - Seção transversal dos corpos de prova em pasta geopolimérica porosa.....	37
Figura 21 - Resultados de absorção de água da pasta geopolimérica porosa.....	38
Figura 22 - Resultados de densidade aparente da pasta geopolimérica porosa.....	38
Figura 23 - Resultados de porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa.....	39
Figura 24 - Relação densidade aparente x absorção de água da pasta geopolimérica porosa..	40
Figura 25 - Relação densidade aparente x porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa .	40
Figura 26 - Relação absorção de água x porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa	41
Figura 27 - Resultados ensaio de flexão dos corpos de prova em pasta geopolimérica porosa	42

Figura 28 - Relação resistência à flexão x densidade aparente da pasta geopolimérica porosa	43
Figura 29 - Relação resistência à flexão x absorção de água da pasta geopolimérica porosa ..	44
Figura 30 - Relação resistência à flexão x porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa .	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do metacaulim	26
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do metacaulim	26
Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do NaOH	28
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do Na ₂ SiO ₃	28
Tabela 5 - Relação da pasta de referência.	31
Tabela 6 - Formulações propostas para a pasta geopolimérica porosa.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABMACO – Associação Brasileira de Materiais Compósitos

Al – Alumínio

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio (Alumina)

CERMAT – Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos

cm – Centímetros

CP – Cimento Portland

Fe – Ferro

FV – Fibras de Vidro

g – Grama

g/cm³ – Gramas por Centímetro Cúbico

H – Hidrogênio

h – Hora

H₂O – Água

H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio (água oxigenada)

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

K – Caulinita

K₂O – Óxido de Potássio

KOH – Hidróxido de Potássio

L – Mica

LabICons – Laboratório Interdisciplinar Construção Sustentável

M – Molar

Máx – Máximo

MgO – Óxido de Magnésio

min – Minuto

MK – Metacaulim

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

mW/mK - Miliwatt por Metro Kelvin

Na – Sódio

Na₂CO₃ – Carbonato de Sódio

Na₂O – Óxido de Sódio

NaCl – Cloreto de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

NBR – Norma Brasileira

O – Oxigênio

OH – Hidroxila

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo

PA – Pó de Alumínio

ppm – Pontos por Milhão

Q – Quartzo

S/L – Sólido/Líquido

Si – Silício

SiO₂ – Óxido de Silício (Silica)

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

µm – Micrômetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. GEOPOLÍMERO	14
2.1.1. Metacaulim	15
2.1.2. Ativadores	16
2.1.3. Aplicações	17
2.1.4. Propriedades	18
2.2. GEOPOLÍMERO LEVE.....	20
2.3. FIBRA DE VIDRO	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. MATERIAIS.....	24
3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	30
3.2.1. Definição de Formulações e Produção das Amostras	30
3.2.2. Ensaio de Flexão	33
3.2.3. Propriedades Físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. ANÁLISE MORFOLÓGICA	36
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS: ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE ABERTA	37
4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	41
5. CONCLUSÃO	45
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

O concreto é atualmente um dos materiais mais utilizados na construção civil e a evolução de suas características, como custo, durabilidade e sustentabilidade, é constante (HANGEMANN, 2011). O cimento Portland é o principal componente do concreto, comumente utilizado na construção civil, e sua produção é responsável por aproximadamente 5% da emissão dos gases de efeito estufa mundiais por ano, segundo a Global Cement and Concrete Association (GCCA, 2020).

Na busca por um material que pudesse substituir o cimento Portland e gerar menor impacto ambiental, Davidovits cria, em 1978, o geopolímero. Davidovits (2013) apresenta os geopolímeros como uma alternativa real ao uso do cimento Portland na construção civil como um todo, sendo um material minimamente processado a partir de recursos naturais, o que reduz a energia aplicada em sua produção e a emissão dos gases de efeito estufa.

Segundo Davidovits (1991), o geopolímero é um material produzido a partir de ligações moleculares covalentes, provenientes das reações alcalinas de aluminas e silicatos. Além de sustentáveis, esses materiais têm como propriedades, alta resistência mecânica e química, resistência à gelo-degelo e excelente resistência ao fogo (CILLA, 2015).

Cilla (2015) ressalta que os geopolímeros podem ser aplicados na produção de tijolos, cerâmicas, isolamento térmico, proteção contra chamas, armazenamento de resíduos tóxicos e radioativos e equipamentos de fundição.

Uma alternativa para a obtenção de um material mais leve é a criação de porosidades. Silva et al. (2018) explicam que, para gerar esses poros (vazios) no material, é necessário o uso de aditivos. Segundo Novais et al. (2016a), a geração de poros no material aumenta o isolamento térmico e diminui sua densidade, porém, diminui sua resistência mecânica. A densidade aparente de pastas geopoliméricas não porosas está entre 0,99 e 1,17 g/cm³, enquanto para porosas chegam a 0,44 e 0,91 g/cm³ (NOVAIS et al., 2016b).

Para demonstrar o efeito dos poros na resistência a compressão, pode-se comparar dois resultados obtidos por Novais et al. (2016b), enquanto um corpo de prova com 47,8% de porosidade e densidade aparente de 1,15 g/cm³ alcança cerca de 21 MPa em 28 dias, um corpo de prova com 70,9% de porosidade e densidade aparente de 0,64 g/cm³ alcança apenas 2 MPa no 28º dia. Assim também para a condutividade térmica, o primeiro tem resultados de 226 ± 12 mW/mK e o segundo apresenta 97 ± 2 mW/mK.

Nesse sentido, este trabalho realizou a avaliação mecânica de pastas geopoliméricas porosas e com incorporação de fibra de vidro. Os poros foram gerados pela adição de pó de alumínio (PA) e a incorporação de fibras de vidro (FV) teve como intuito a melhora das propriedades mecânicas do material.

Buscando uma forma de reutilizar materiais que seriam descartados, a fibra de vidro comercial, incorporada à pasta geopolimérica, foi substituída em diferentes teores por uma fibra de vidro residual, da indústria. E para que seu uso fosse justificado, os impactos dessa substituição foram avaliadas as propriedades mecânicas e físicas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência da substituição da fibra de vidro comercial pela residual, em diferentes proporções, nos corpos de prova produzidos em pasta geopolimérica porosa.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Produzir corpos de prova em pasta geopolimérica porosa, utilizando pó de alumínio e adição de fibra de vidro comercial e residual, para avaliação da resistência à flexão, absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta, aos 28 dias;
- Avaliar a influência da substituição da fibra de vidro comercial pela residual (nas proporções de 0%, 33%, 67% e 100%, em relação a massa) na resistência à flexão dos corpos de prova em pasta geopolimérica porosa;
- Avaliar a influência da substituição da fibra de vidro comercial pela residual (nas proporções de 0%, 33%, 67% e 100% em relação a massa) na absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta dos corpos de prova em pasta geopolimérica porosa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os conceitos e assuntos pertinentes ao entendimento do tema do presente trabalho. Assim, a pesquisa foi baseada em quatro tópicos principais, sendo eles, o conceito do que é o geopolímero, suas propriedades, a definição de geopolímero poroso e apresentação da fibra de vidro como material utilizado.

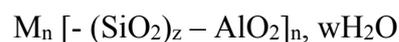
2.1. GEOPOLÍMERO

Em 1979, Joseph Davidovits criou e tornou público o termo Geopolímero que viria a ser usado para identificar compostos poliméricos inorgânicos (DAVIDOVITS, 2005). Os geopolímeros são também chamados de polissialatos, por possuírem cadeias de sílico-óxido-aluminato, e possuem estrutura amorfa à semicristalina (DAVIDOVITS, 1991).

Segundo Feng et al. (2012), os geopolímeros são obtidos a partir da mistura de uma solução altamente alcalina com um material aluminossilicato sólido. Além disso, Feng et al. (2012), definem que a estrutura dos geopolímeros é formada pelo acúmulo de unidades tetraédricas de aluminossilicato.

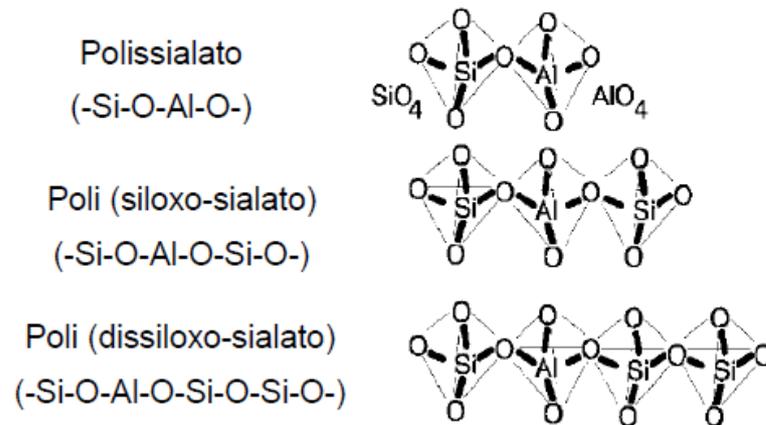
Para Davidovits (1994), a reação chamada geossíntese (ciência para produção de rocha artificial à temperatura abaixo de 100°C) resulta na representação de polímeros naturais na estrutura dos polissialatos com o objetivo de obter características naturais como dureza, durabilidade e estabilidade térmica.

Davidovits (2005), descreve a fórmula química dos polissialatos da seguinte forma:



Onde M é um cátion (K, Na, Ca), n é o grau de policondensação e z pode ser 1, 2 ou 3. Skaf (2008), salienta que as estruturas dos polissialatos são de três tipos, conforme suas unidades poliméricas: polissialatos (Si/Al=1), polissiloxossilatos (Si/Al=2) ou polidissiloxossilatos (Si/Al=3) (Figura 1).

Figura 1 - Representação dos Polissialatos



Fonte: Davidovits (1994, p. 2).

A policondensação, ou geopolimerização, é uma reação química exotérmica, que torna possível a obtenção dos geopolímeros. Nesta reação ocorre a dissolução de Al e Si na solução alcalina, em seguida ocorre a condensação, na qual há a formação de um gel que é transformado em uma malha tridimensional de sílico-aluminato (VASSALO, 2013).

2.1.1. Metacaulim

Os geopolímeros são materiais formados a partir de uma reação química alcalina de aluminossilicatos, portanto sua matéria prima deve ser rica em alumina e sílica. O metacaulim é um material muito utilizado na obtenção dos geopolímeros e provém do tratamento térmico do caulim em temperaturas elevadas (por volta de 750°C) por 24h (DAVIDOVITS, 2005). Segundo Boca Santa (2012), esse processo chama-se desidroxilação e torna o caulim mais reativo e propício à ativação alcalina.

O caulim é um material argiloso de cor branca, ou quase branca, com baixo teor de ferro e tem sido obtido há muito tempo na colina de Jauchau Fu na China, de onde provém seu nome Kauling (colina alta) (SILVA, 2001). De acordo com Silva (2001), o caulim é um dos mais abundantes e relevantes materiais em até 10 metros de profundidade na corte terrestre.

A caulinita, principal constituinte do caulim, é um silicato de alumínio hidratado, apresentado pela fórmula $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ e tem composição teórica de 39,50% de Al_2O_3 , 46,54% de SiO_4 e 13,96% de H_2O , com pequenas variações já observadas (LUZ et al., 2009).

Conforme Mártires (2009), o caulim é um material branco, com grande capacidade de cobertura, fácil dispersão, baixa condutividade térmica e elétrica, é brando e pouco abrasivo e é inerte em uma grande faixa de pH. Para Luz et al. (2009), essas características tornam esse

material elementar para a produção de diversos produtos como o papel, a cerâmica branca, fibra de vidro, tintas, plásticos, refratários, concreto de alto desempenho e cimento branco, vidros, entre outros.

Na norma NBR 15894-1:2010 são especificados valores de SiO_2 entre 44% e 65% e Al_2O_3 entre 32% e 46%.

2.1.2. Ativadores

Como já apresentado, os geopolímeros são obtidos através de uma reação advinda da mistura de uma solução alcalina com um material sólido, rico em alumina e sílica, nesse caso o metacaulim. Esta solução alcalina é também chamada de ativador, o qual pode ser simples ou composto. De acordo com Boca Santa (2012) os ativadores simples mais utilizados atualmente são o hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), podendo ainda ser usados como ativadores compostos, com a adição silicato de potássio ou de sódio.

Os ativadores compostos são mais eficientes, pois desenvolvem o processo de forma mais rápida. Isto ocorre, visto que os hidróxidos presentes desempenham duas funções, primeiramente, a sua função semelhante à um ativador simples, dissolvendo os aluminossilicatos, e por conseguinte reorganiza a estrutura, funcionando como um ligante (PINTO, 2006).

Segundo Weedert (2011), o ativador de hidróxido de sódio é menos expansivo que o ativador de hidróxido de potássio, sendo menos viscoso e tendendo a perder solubilidade quando em baixas temperaturas. Além disso, Davidovits (2013) declara que os ativadores compostos de silicato de potássio podem atingir o dobro da resistência a compressão, quando comparado aos de silicato de sódio.

Para Palomo et al. (1999 apud CESARI, 2015), a ativação alcalina é um processo químico que transforma, em um material cimentício compacto, estruturas amorfas, parcialmente amorfas ou metaestáveis. Os ativadores dissolvem o material aluminossilicato ao entrar em contato com o mesmo.

Durante o processo de cura do geopolímero, podem ser identificados formações cristalinas e esbranquiçadas em sua superfície. Estas, chamadas de eflorescências, são provenientes do excesso de hidróxidos de sódio ou de potássio (ativadores). Para que não ocorra, as concentrações de Al/Na ou Al/K deve ser o mais próximo de 1 (OSÓRIO, 2006).

Apesar da importância da correta concentração dos ativadores na mistura geopolimérica, autores como Bai e Colombo (2018) e Provis e Deventer (2009), consideram que as eflorescências são um problema muito mais de aparência do que de fato estrutural.

2.1.3. Aplicações

Segundo Sonafrank (2010), na Austrália, Canadá e em países da Europa, os geopolímeros são utilizados como dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados para construções, blocos, refratários, reparações de rodovias, obras de infraestrutura entre outros. Ele ainda afirma que, apesar da utilização praticamente limitada aos países desenvolvidos, graças a ampla possibilidade de aplicações dos geopolímeros, são frequentes as pesquisas direcionadas ao seu desenvolvimento em todo o mundo.

Os geopolímeros apresentam aplicabilidade nas mais diversas áreas da construção civil pelas suas propriedades, físicas e mecânicas, notáveis, como: alta resistência mecânica, resistência ao gelo-degelo, elevada inércia química, excelente comportamento ao fogo, possibilidade de imobilização de resíduos tóxicos, metais pesados e inclusive materiais radioativos (PINTO, 2004).

Davidovits (2002), cita várias aplicações para os geopolímeros, uma delas foi um dos focos de seus estudos após os incêndios ocorridos na França entre os anos de 1970 e 1973, a resistência dos geopolímeros ao fogo; também é apontado por ele a reparação de rodovias e demais obras de infraestrutura (figura 2).

Figura 2 - Aplicação de concreto geopolimérico em rodovias



Fonte: Davidovits (2002).

Na Figura 3 é apresentado por Davidovits (2002) uma aplicação no setor aeroviário, com o avião, chamado de Rafale, desenvolvido através da utilização de moldes geopoliméricos, pela companhia aeronáutica francesa Dassault Aviation.

Figura 3 - Avião Rafale, desenvolvido com moldes geopoliméricos



Fonte: Davidovits (2002).

E na Figura 4, vigas de concreto geopolimérico para reforço de pontes danificadas e edifícios em áreas propensas a furacões e terremotos.

Figura 4 - Viga produzida em concreto geopolimérico



Fonte: Davidovits (2002).

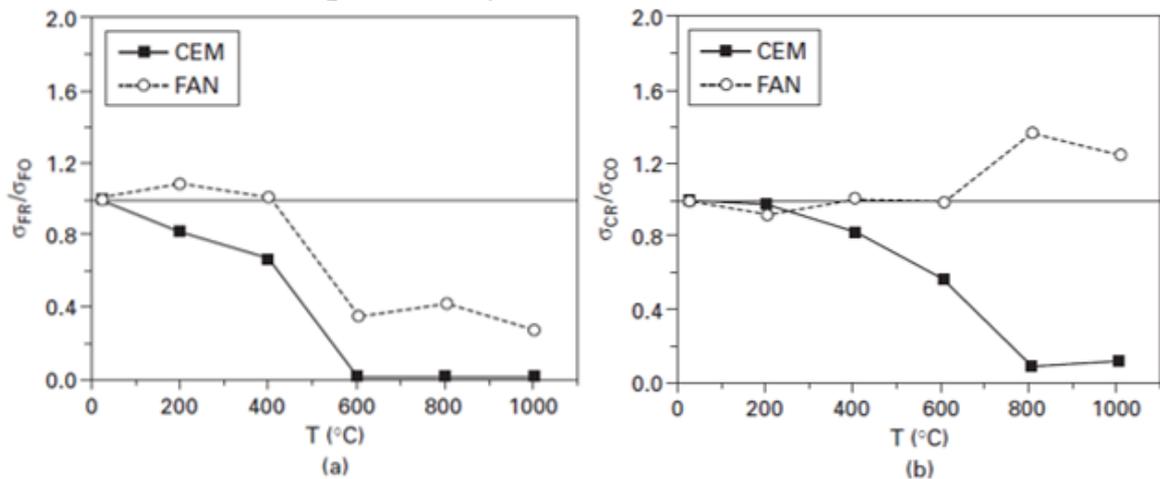
2.1.4. Propriedades

Os geopolímeros possuem propriedades únicas como alta resistência mecânica inicial, grande durabilidade, resistência aos ataques químicos, capacidade de neutralizar átomos tóxicos e baixa taxa de emissão de carbono e de uso de energia. A fim de aumentar a utilização do

geopolímero como substituinte do Cimento Portland, é importante que estas propriedades sejam amplamente estudadas para sanar as dúvidas e receios do mercado (MAJIDI, 2009).

Segundo Davidovits (1991), os geopolímeros possuem excelente resistência ao fogo. Provis e Deventer (2009) afirmam, baseados em diversos autores, que esta resistência às chamas é melhor do que a apresentada pelos concretos e argamassas de cimento Portland. Esta afirmação pode ser verificada pelos gráficos presentes na Figura 5. O gráfico (a) representa a resistência residual à flexão e o gráfico (b) a resistência residual à compressão em amostras de pasta de cimento Portland (CEM) e geopolímero (FAN), após a exposição de uma hora em altas temperaturas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al. 2008 apud PROVIS; DEVENTER, 2009).

Figura 5 - Geopolímeros e Cimento Portland



Fonte: Provis e Deventer (2009, p.185).

Ao comparar algumas propriedades do geopolímero com o cimento Portland (Figura 6), podemos observar que a principal desvantagem do geopolímero é o seu custo mais elevado de produção (ANDRADE, 2019).

Figura 6 - Geopolímeros x Cimento Portland

Propriedades	Geopolímero	Cimento Portland
Custo (TORGAL <i>et al.</i> , 2011)	maior	menor
Formação de matriz imobilizadora de resíduos tóxicos (PROVIS, 2018)	sim	não
Resistência a temperaturas elevadas (DAVIDOVITS, 1991)	alta	baixa
Resistência aos ácidos (DUXSON <i>et al.</i> , 2007; TORGAL e JALALI, 2010)	alta	baixa
Alta resistência inicial (DAVIDOVITS, 2013)	24 horas	Mínimo de 7 dias (CP V)

Fonte: Andrade (2019, p. 9).

Quanto à resistência à compressão, Davidovits (2013) apresenta geopolímeros com 20 MPa em 4 horas chegando a 90 MPa em 28 dias. Segundo Osório (2006), os geopolímeros podem atingir resistências à compressão de 50 a 150 MPa. Pastas geopoliméricas com resíduos da agroindústria atingiram entre 25 e 30 MPa em 24 horas e 60 MPa em 28 dias (BIGNO, 2008). E Silva (2006) afirma que pastas de metacaulim podem se aproximar de valores como 29 MPa em 24 horas, 51 MPa em sete dias e 55 MPa em 28 dias.

2.2. GEOPOLÍMERO LEVE

Os geopolímeros porosos são uma alternativa na produção de geopolímeros leves, que tem como característica principal serem mais leves, do que os geopolímeros tradicionais, por possuírem menor densidade. Esses materiais leves são mais utilizados como isolante térmico e acústico na construção civil, porém, Masi et al. (2014) dizem que os geopolímeros leves também podem ser usados como materiais de construção, levando em conta a sua redução na resistência. Novais (2016a) ainda estudou esse material como filtro para tratamento de efluentes e estabilização de pH.

A formação desses vazios (poros) ocorre, pois, são adicionados agentes, surfactantes, na argamassa geopolimérica que produzem gases, durante a geopolymerização, os quais ficam aprisionados (MASI et al., 2014). Para Novais et al. (2016b), os geopolímeros de baixa densidade são uma excelente alternativa para a construção civil, visto que combinam boa performance e benefícios ambientais.

Os agentes mais utilizados para a formação dos vazios são o pó de alumínio, pó de zinco e peróxido de hidrogênio (NOVAIS et al., 2016b). Conforme Bai e Colombo (2018), as propriedades do geopolímero e a estrutura de poros são modificadas tanto pelo tipo de surfactante quanto também pela quantidade empregada na formulação.

Deve-se atentar que o uso demasiado desses agentes causa reações adversas, no caso do pó de alumínio pode haver a produção de poros grosseiros e mal distribuídos e até mesmo o colapso dos poros. Assim também, o excesso na concentração de peróxido de hidrogênio na formulação causa o fenômeno da coalescência, onde não há mudanças significativas na densidade do geopolímero (MASI et al., 2014). Segundo Novais et al. (2016a), a adição desses agentes na argamassa geopolimérica afeta também a geopolymerização e a reologia da pasta.

Masi et al. (2014) afirmam que algumas das propriedades mais importantes dos geopolímeros porosos são a leveza e boas condições de condutividade térmica e de isolamento

acústico. Contudo, a resistência mecânica dos geopolímeros porosos decai proporcionalmente a diminuição da sua densidade, ressaltam Masi et al. (2014).

Bai e Colombo (2018) explicam que as relações entre porosidade e resistência mecânica dos geopolímeros foram estudadas por diversos autores. De acordo com Senff et al. (2020), a redução das resistências mecânicas nos geopolímeros porosos é inevitável. E Novais et al. (2016b) confirma, dizendo que a resistência à compressão será menor quanto maior forem os poros.

Novais et al. (2016b) demonstra essa perda de resistência a compressão comparando resultados de dois corpos de prova, enquanto um corpo de prova com 47,8% de porosidade e densidade aparente de 1,15 g/cm³ alcança cerca de 21 MPa em 28 dias, um corpo de prova com 70,9% de porosidade e densidade aparente de 0,64 g/cm³ alcança apenas 2 MPa no 28º dia.

Senff et al. (2020) também expõem resultados onde uma amostra de referência com cerca de 32% de porosidade e 1,65 g/cm³ de densidade aparente, apresenta 3,9 MPa de resistência a flexão e 25 MPa de resistência a compressão, de forma que outra amostra com aproximadamente 62% de porosidade e 0,97 g/cm³ de densidade aparente desenvolve resistência a flexão de 1,0 MPa e a compressão de 2,3 MPa.

Entretanto, Aguilar et al. (2010) afirmam que é possível regular a formulação do geopolímero para que seja encontrado a melhor combinação entre diminuição de densidade e manutenção da resistência mecânica.

Além dos geopolímeros porosos, outras alternativas são as adições de diferentes materiais leves à argamassa, com o objetivo de diminuir sua densidade. Entre esses materiais pode-se citar a cortiça, borracha e poliestireno expandido.

2.3. FIBRA DE VIDRO

Fibras de vidro (FV) são materiais de origem sintética e fibrosos que possuem características e propriedades diversas, dependendo da sua composição, tratamento superficial, processo produtivo e forma final. São comumente utilizados como reforços em diferentes campos da engenharia. Esse material pode ser apresentado como manta, tecido, cortada e como roving (ARAUJO, 2012).

De acordo com informações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e da Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO), no Brasil são geradas cerca de 18 mil toneladas de resíduos compósitos por ano, sendo a fibra de vidro 75% desse total (IPT, 2010).

Segundo Grizzo (2013), as fibras de vidro são produzidas por um processo de mistura e fusão, a cerca de 1400 °C, dos óxidos que o compõem. O material fundido é extrudado através de uma matriz com vários furos, formando os filamentos que passam por um tratamento superficial na sequência.

Conforme Motezuki (2010), as FV podem ter como matéria prima areias, argilas ou vidro reciclado. A ASTM D578 é uma das normas que classificam as FV de acordo com sua composição química e características, apresenta Grizzo (2013), como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Classificação dos tipos de fibra de vidro

Composição	Tipo A	Tipo C	Tipo E	Tipo S
S _i O ₂	72,0	64,4	55,2	64,4
Al ₂ O ₃	1,0	4,1	14,5	25,0
CaO	8,0	13,4	18,7	-
MgO	4,0	3,3	4,6	10,3
Na ₂ O	14,0	8,5	0,3	0,3
K ₂ O	-	1,1	0,2	-
B ₂ O ₃	-	4,7	6,5	-
Características	Tipo A	Tipo C	Tipo E	Tipo S
Densidade (g/cm ³)	2,50	2,49	2,54	2,48
Resistência a Tração (GPa)	3,00	3,3	3,45	4,59
Módulo de Elasticidade (GPa)	69	69	70	86
Diâmetros (µm)	-	-	3-20	8-13
Coefficiente de Condutividade Térmica (W/mK)	-	13	13	13
Coefficiente de Expansão Térmica (ppmK ⁻¹)	8,6 x 10 ⁻⁶	7,2 x 10 ⁻⁶	4,9 x 10 ⁻⁶	5,6 x 10 ⁻⁶

Fonte: Grizzo (2013, p. 18).

Como mencionado anteriormente, ao produzir poros na estrutura dos geopolímeros, com o intuito de se reduzir sua densidade, há a perda de resistência mecânica do material.

Portanto, buscam-se alternativas que auxiliem na manutenção dessa resistência sem comprometer suas demais propriedades. Segundo Senff et al. (2020), as fibras de vidro aumentam consideravelmente a resistência à compressão e à flexão do material geopolimérico sem afetar suas propriedades de isolamento.

Como apresentado por Senff et al. (2020), a introdução de fibra de vidro, na matriz de um geopolímero poroso, na porcentagem de 2,0% do seu peso, gerou um aumento de 23% na resistência à flexão e 30% na resistência a compressão da argamassa geopolimérica. Novais et al. (2017) apontam que com adição de fibra de vidro, em argamassas geopoliméricas não porosas, o aumento das resistências à compressão e à flexão chegam a, aproximadamente, 162% e 77%, respectivamente. Além disso, essa adição de fibra de vidro não altera, de forma significativa, a densidade do geopolímero, destacam Novais et al. (2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo as metodologias, materiais e equipamentos utilizados na produção das pastas geopoliméricas e no seu estudo, serão apresentados. Para analisar os efeitos da adição de fibra de vidro, tanto residual quanto comercial, numa pasta geopolimérica porosa, foram realizados ensaios e comparações entre os resultados.

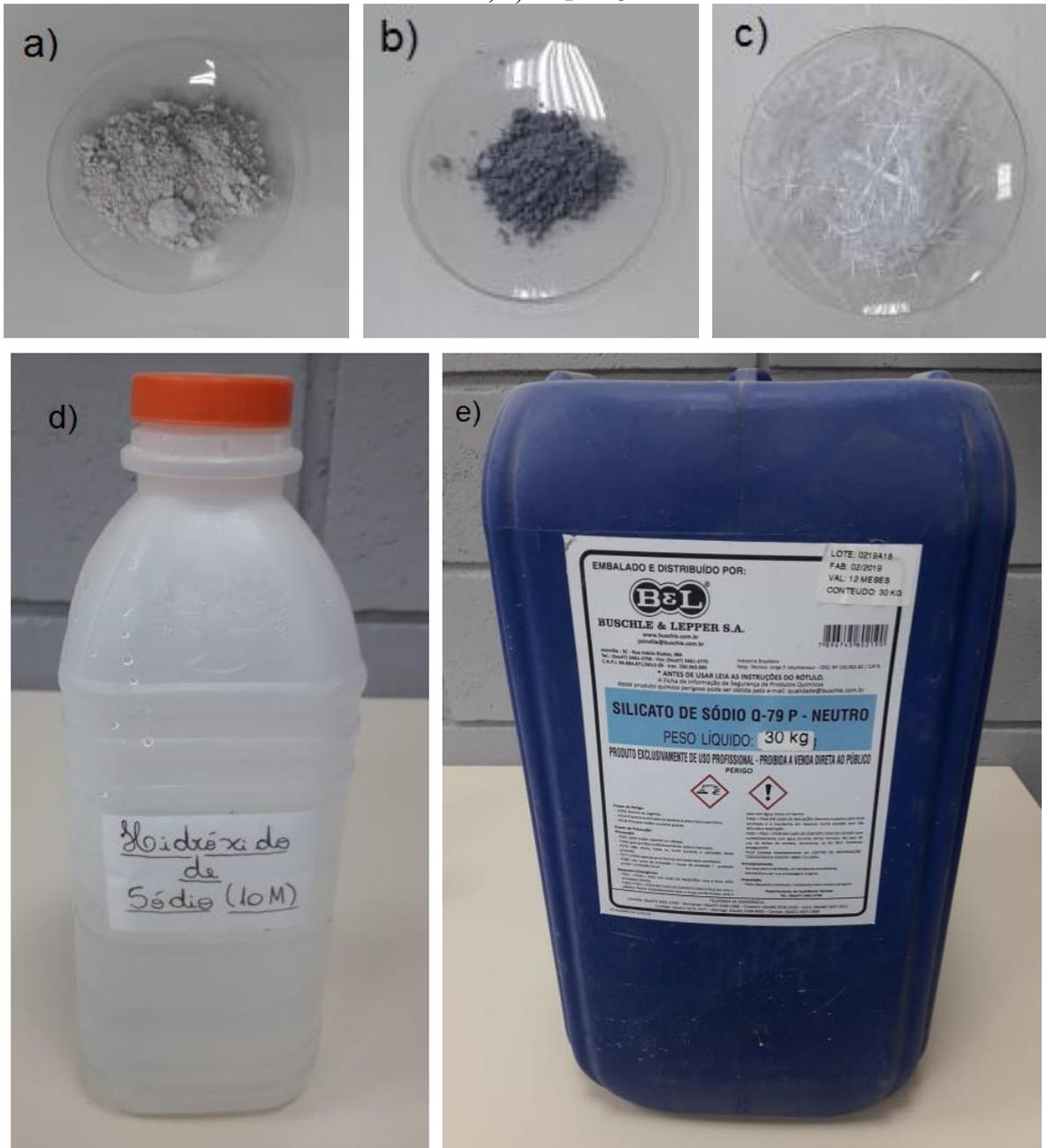
Dessa forma, a produção das amostras e os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Laboratório Interdisciplinar Construção Sustentável (LabICons) da UFSC, Campus de Joinville. Além disso, os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório da Universidade Católica de Joinville.

Para a produção das amostras o metacaulim, hidróxido de sódio, silicato de sódio, pó de alumínio e fibra de vidro comercial foram fornecidos pelo laboratório, assim como os equipamentos necessários para a produção e ensaios. A fibra de vidro residual foi fornecida pela empresa Tecnofibras, localizada na cidade de Joinville.

3.1. MATERIAIS

As pastas geopoliméricas são, de forma geral, produzidas a partir da mistura de uma solução alcalina com um material aluminossilicato. Ademais, no presente trabalho tem-se como objetivo avaliar uma pasta porosa e com adição de fibra de vidro. Portanto, os materiais utilizados para tal fim, apresentados na Figura 8, foram: Metacaulim (fonte de aluminossilicato), Pó de alumínio (agente gerador de poros), Fibra de vidro (adição) e uma solução de água, hidróxido de sódio (NaOH) 10 M e Silicato de sódio (Na_2SiO_3), como ativador alcalino.

Figura 8 - Materiais utilizados: a) Metacaulim; b) Pó de alumínio; c) Fibra de vidro; d) NaOH 10 M; e) Na_2SiO_3



Fonte: Autor (2021).

O metacaulim foi fornecido pela empresa Metacaulim Brasil com o nome de Metacaulim HP ultra e sua composição básica segue a norma NBR 15894/10. A composição química do metacaulim utilizado no estudo foi também determinada por Cermat (2015) através de fluorescência de raios-X. O resultado pode ser verificado na Tabela 1. Na Tabela 2 é possível observar as propriedades físicas e químicas disponibilizadas pela fornecedora, comparadas aos valores contemplados em norma.

Tabela 1 - Composição química do metacaulim

METACAUULIM										
Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	FeO ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Teor (%)	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	< 0,05	< 0,05	0,06	57,12	1,51
Perda ao Fogo (%)	2,62									
Área Específica (m ² /kg)	32700									

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

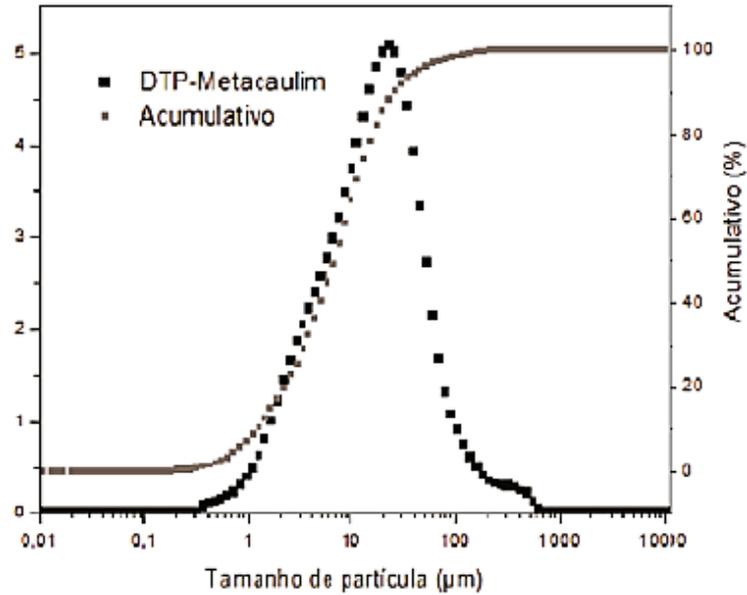
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do metacaulim

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO ₄	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,10%	< 1,50%
SO ₃	< 0,10%	< 1,00%
Na ₂ O	< 0,10%	< 0,50%
Eq. Alcalino Na ₂ O	< 1,50%	< 1,50%
Fe ₂ O ₃	2,00%	--
TiO ₂	1,50%	--
Umidade	0,50%	< 2,00%
Perda ao Fogo	3,00%	< 4,00%
Resíduo #325	6,00%	< 10,00%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880 mg Ca(OH) ₂ /g	> 750 mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000 cm ² /g	150.000 cm ² /g
Massa Específica	2,65 kg/dm ³	--

Fonte: Metacaulim do Brasil (2017).

A distribuição da granulometria do metacaulim, Figura 9, determinada por Cermat (2015), sendo o tamanho médio destas partículas igual a 21 µm e D₅₀ = 6,5 µm.

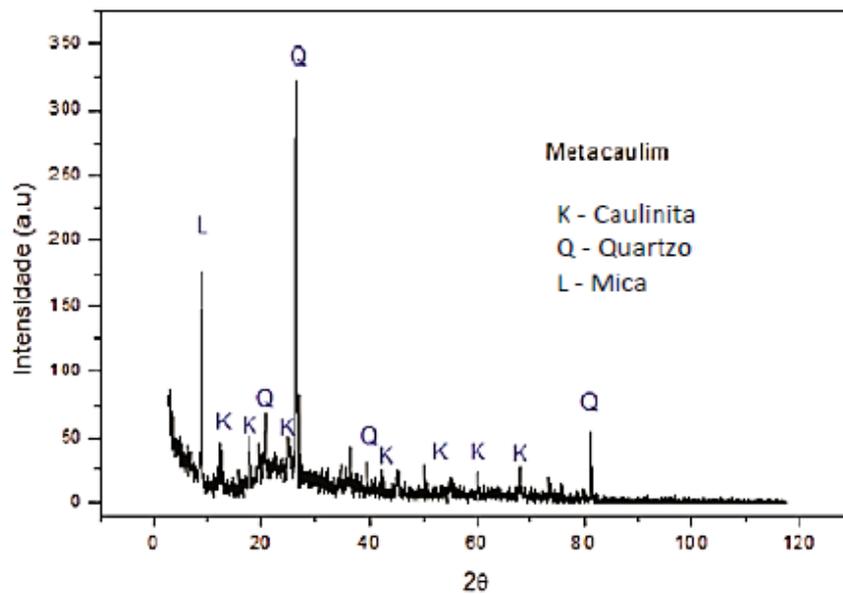
Figura 9 - Distribuição do tamanho de partículas do metacaulim



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

A Figura 10 mostra as fases cristalinas de mica (L), quartzo (Q) e caulinita (K), verificadas a partir do ensaio de difração de raios-X, realizado por CERMAT (2015).

Figura 10 - Difração de raios-X do metacaulim



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

As Tabelas 3 e 4 apresentam as especificações técnicas e composição química dos ativadores alcalinos (NaOH 10 M e Na₂SiO₃, respectivamente), ambos produzidos e fornecidos pela Buschle & Lepper S/A

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do NaOH

Propriedades Físico-Químicas	Especificação
Concentração (NaOH)	97% a 100%
Carbonatos (Na ₂ CO ₃)	< 0,60%
Cloretos (NaCl)	< 0,03%
Ferro (Fe)	< 6,00 ppm
Densidade aparente	2,138 g/cm ³
Massa Molecular	40 g/mol
pH	12,7 (solução de 01 mol/L)
Solubilidade em água	109 g em 100 g de H ₂ O
Ponto de ebulição/intervalo de ebulição	1390°C (Solução com 90% a 95% de NaOH em peso)
Ponto de fusão	318°C

Fonte: Departamento técnico – Buschle & Lepper S/A (2017).

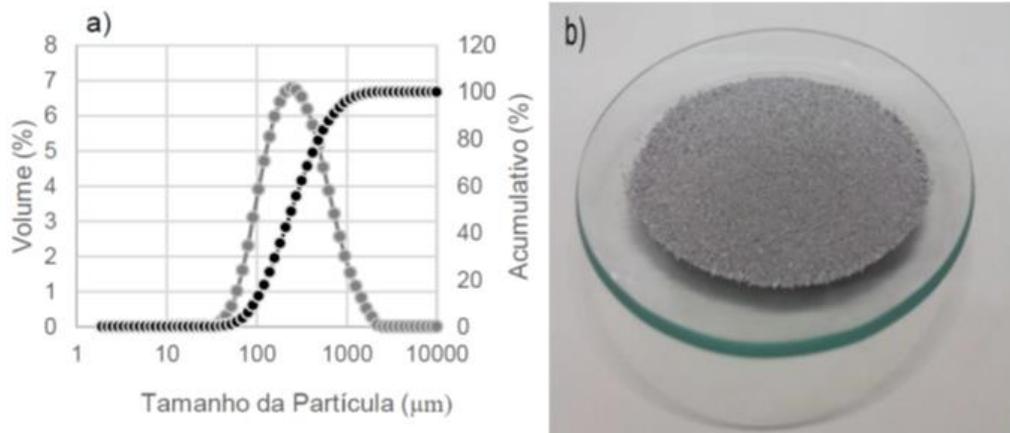
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do Na₂SiO₃

Propriedades Físico-Químicas	Especificação
Na ₂ O	9,11%
SiO ₂	28,50%
(SiO ₂)/(Na ₂ O)	3,13
Sólidos Totais	37,61%
Água	61,18%
Viscosidade	250 a 500 cP
Densidade (25°C)	1390 a 1420 g/cm ³

Fonte: Departamento técnico – Buschle & Lepper S/A (2017).

O pó de alumínio presente nas formulações, para a produção de poros, foi cedido pela empresa Alcoa e um estudo feito por CERMAT (2016) avaliou a variação granulométrica das partículas de alumínio. Os resultados estão expostos na Figura 11.

Figura 11 - a) Distribuição granulométrica do pó de alumínio; b) Amostra de pó de alumínio.



Fonte: Núcleo de pesquisas CERMAT (2016).

Por fim, como as fibras de vidro são consideradas inertes para a formulação geopolimérica, não foram realizadas análises químicas de sua composição, sabe-se, contudo, que sua composição é predominantemente de SiO_2 e Al_2O_3 . Além disso, foi definido que o diâmetro dos filamentos e seu comprimento, para adição às formulações, são de aproximadamente 20 μm e 15 mm, respectivamente, para ambas as opções de fibras (comercial e residual). A densidade das fibras de vidro, tanto comercial quanto a residual é em torno de 2,68 g/cm³.

Figura 12 - Retalho de manta de fibra de vidro.



Fonte: Autor (2021).

Como já foi abordado, as fibras residuais são provenientes da indústria. Foram fornecidas em retalhos de mantas (Figura 12), que posteriormente foram separadas e cortadas no comprimento determinado, 15 mm, com o auxílio de uma guilhotina de papel (Figura 13).

Figura 13 - Guilhotina de papel.



Fonte: Autor (2021).

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A etapa experimental se divide em duas partes. Primeiramente, foram definidas as formulações com as quais foram produzidos os corpos de prova. Posteriormente, esses corpos de prova foram ensaiados, para caracterização das misturas e aquisição de informações que auxiliaram no entendimento dos impactos da adição das fibras de vidro em uma matriz geopolimérica porosa.

3.2.1. Definição de Formulações e Produção das Amostras

Para que fosse possível avaliar os impactos da inserção de fibra de vidro residual em uma pasta geopolimérica, foi escolhida uma formulação previamente testada, a qual apresentou bons resultados de resistência com valores de desvio relativamente baixos.

Inicialmente esta formulação foi testada com a adição de fibra de vidro de origem comercial. Para efeito de aplicação neste trabalho, a fibra de vidro comercial foi gradualmente substituída pela residual, de forma que sua proporção em relação à massa total de fibras na formulação fosse reduzida de 100% a 0%, enquanto a proporção de fibra de vidro residual aumentou de 0% a 100%.

A formulação de referência (Tabela 5), foi escolhida baseada na composição e propriedades químicas, das matérias primas, e em suas propriedades físicas.

Tabela 5 - Relação da pasta de referência.

Formulação pasta de referência		
MK	Silicato	NaOH (10 M)
55%	30%	15%

Fonte: Autor (2021).

A partir desta referência foram adicionados a fibra de vidro em 1% da massa de materiais (metacaulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio) e 0,2% de pó de alumínio, em relação à massa total (materiais + fibra de vidro). Dessa forma foram realizadas cinco formulações, apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Formulações propostas para a pasta geopolimérica porosa

Formulação	MK (%)	NaOH 10M (%)	Silicato (%)	PA (%)	FV Com. (%)	FV Re. (%)	FV Total (%)
1,00FVc+0,00FVr	55,00	15,00	30,00	0,20	1,00	0,00	1,00
0,67FVc+0,33FVr	55,00	15,00	30,00	0,20	0,67	0,33	1,00
0,33FVc+0,67FVr	55,00	15,00	30,00	0,20	0,33	0,67	1,00
0,00FVc+1,00FVr	55,00	15,00	30,00	0,20	0,00	1,00	1,00
0,00FVc+0,00FVr	55,00	15,00	30,00	0,20	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor (2021).

Na formulação 1,00FVc+0,00FVr, foi adicionado 1% da massa da formulação, em fibra de vidro comercial. Nas formulações 0,67FVc+0,33FVr e 0,33FVc+0,67FVr a fibra de vidro comercial foi substituída pela fibra de vidro residual em 33% e 67%, em relação a massa de fibra, respectivamente. A quarta formulação, 0,00FVc+1,00FVr, teve a adição de fibra de vidro comercial completamente substituída pela residual. Finalmente, na quinta, 0,00FVc+0,00FVr, estava presente somente o metacaulim, hidróxido de sódio, silicato de sódio e pó de alumínio, sendo essa a referência para que seja possível identificar a influência da fibra de vidro na pasta geopolimérica porosa.

A produção dos corpos de prova prismáticos seguiu o procedimento apresentado a seguir. Em um misturador mecânico foram misturadas a solução ativadora NaOH 10 M e o Na₂SiO₃ pelo período de 5 minutos. A seguir, a solução foi adicionada sobre o metacaulim (fonte de alumina e sílica) e foram misturadas em um misturador mecânico na velocidade 3 por 5 minutos. Para que o material fosse homogeneamente incorporado, durante 1 min a mistura foi feita manualmente, retirando das laterais da cuba os materiais que não se misturaram na máquina. Em seguida, toda a mistura foi levada novamente, durante 5 minutos, para o misturador mecânico.

Figura 14 - Fluxograma de produção de pasta geopolimérica.

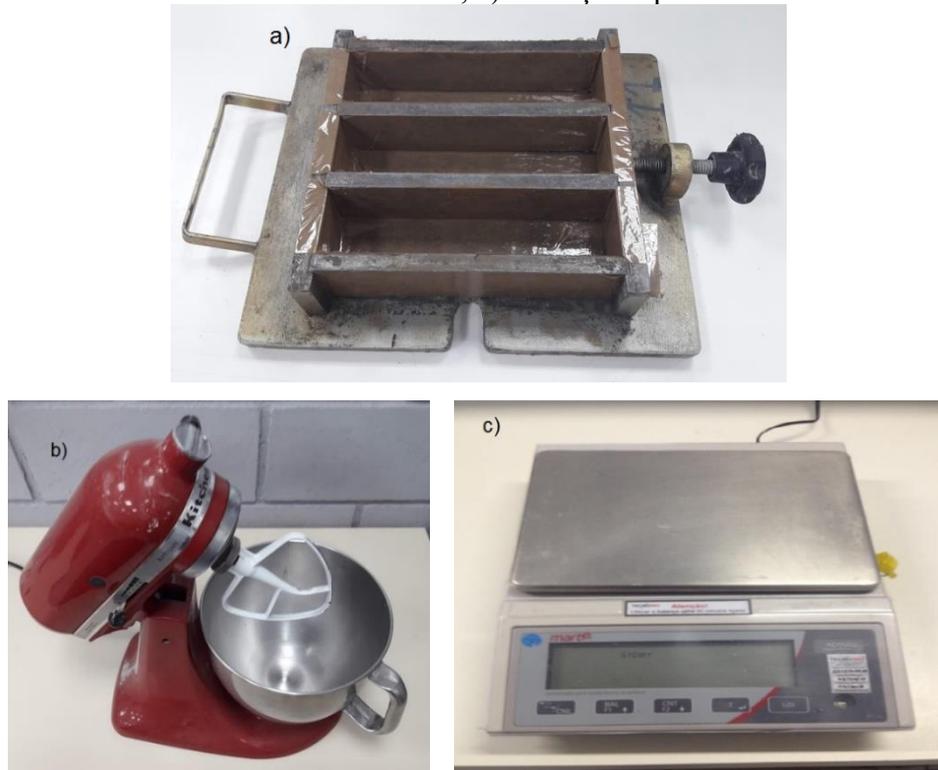


Fonte: Autor (2021).

Ao fim deste tempo, as fibras de vidro foram adicionadas e misturadas por mais 2 min no mesmo misturador. A adição do pó de alumínio, com o intuito de criar poros, foi feita somente nos últimos 30 segundos de mistura na velocidade mais baixa para que a formação de bolhas não fosse prejudicada. Na figura 14 está demonstrado um fluxograma, que apresenta os passos da produção dos corpos de prova.

Após o término da mistura, a pasta foi colocada nos moldes onde permaneceu por pelo menos 24 horas. Depois desse período, os corpos de prova foram desmoldados e deixados em uma sala em temperatura ambiente até completarem 28 dias. Os equipamentos utilizados para a produção dos corpos de prova foram o misturador mecânico, os moldes e balança de precisão (Figura 15).

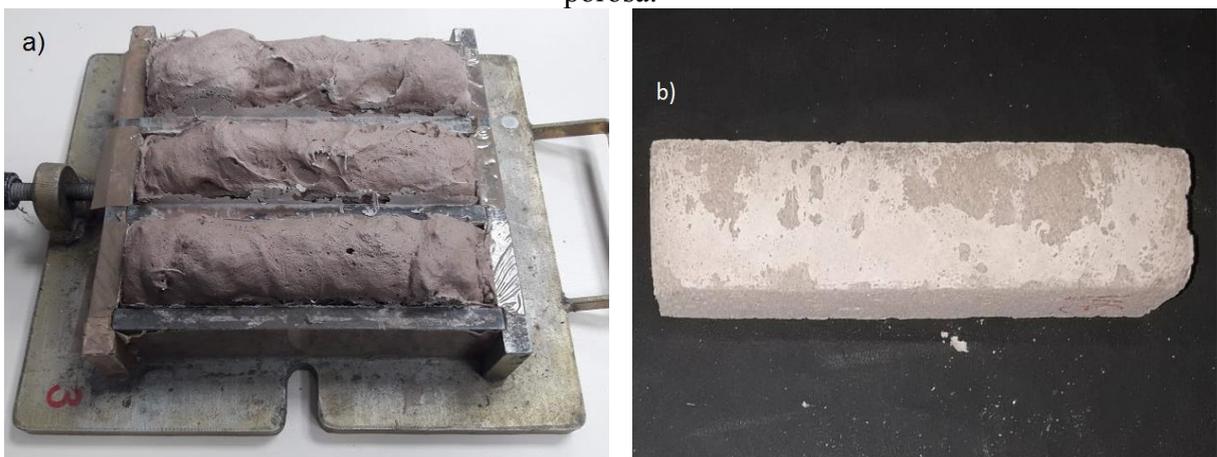
Figura 15 - Equipamentos utilizados para a produção dos corpos de prova: a) molde, b) misturador mecânico, c) balança de precisão.



Fonte: Autor (2021).

Para não prejudicar a formação de poros, a pasta não foi adensada ao ser colocada nos moldes. Devido à utilização do pó de alumínio nas formulações, que produz gases e gera os poros nos corpos de prova, o volume do geopolímero aumenta, fazendo com que ultrapasse os limites do molde. Após a cura completa os corpos de prova foram cortados, sendo retirado o excesso, o que fez com que ficassem com as dimensões de 4cm x 4cm x 16cm, tamanho indicado na norma NBR 13279 (2005). A pasta nos moldes e um corpo de prova pronto podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16 - a) Pasta em processo de cura no molde, b) Corpo de prova em pasta geopolimérica porosa.



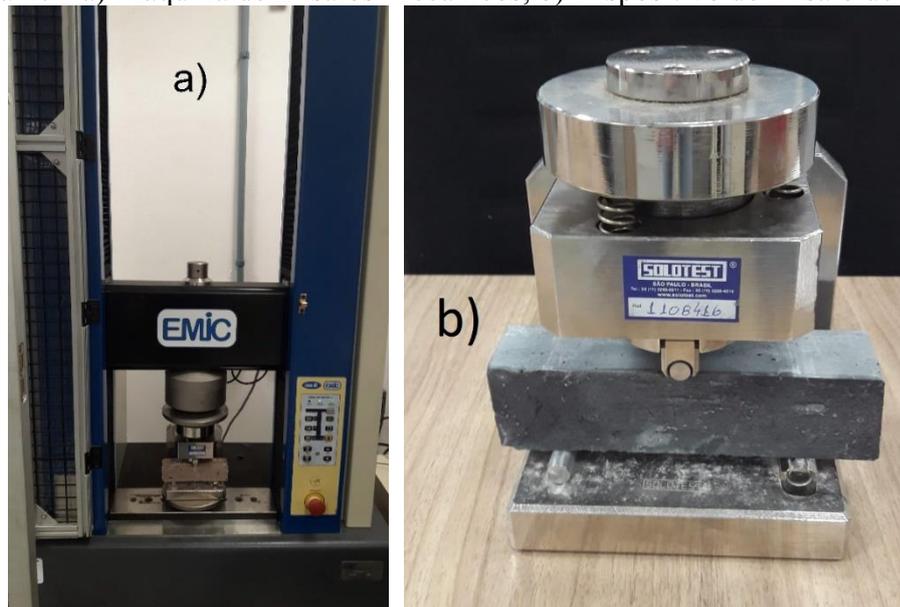
Fonte: Autor (2021).

3.2.2. Ensaio de Flexão

No estado endurecido foi realizado o ensaio de flexão. Todas as 15 amostras das cinco formulações (três corpos de prova de cada), produzidas de acordo com a NBR 13279 (2005), com dimensões de 4cm x 4cm x 16cm, foram submetidas aos ensaios, após a cura de 28 dias.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal para ensaios de tração, compressão e flexão, no Laboratório de Resistência dos Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina, em Joinville. O modelo do equipamento é o EMIC 23-100, eletromecânica, microprocessada da marca INSTRON/EMIC, dupla coluna autoportante e acionamento por meio de fusos de esferas recirculares pré-carregadas com sistema de colunas guias cilíndricas. A Figura 17 apresenta os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

Figura 17 - a) Máquina de Ensaio Mecânicos, b) Dispositivo de Ensaio de Flexão



Fonte: Autor (2021).

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a NBR 13279 (2005). No ensaio de flexão o corpo de prova deve ser posicionado nos dispositivos de apoio do equipamento, de forma que a face que foi cortada não fique em contato nem com os apoios e nem com o ponto de aplicação da carga, para que o corpo de prova fique com as dimensões requeridas. A carga aplicada, até a ruptura do corpo de prova, foi de 50 ± 10 N/s.

3.2.3. Propriedades Físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta

Os ensaios para determinação das propriedades físicas de absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta, foram realizadas após 28 dias de cura dos corpos de prova e seus resultados foram correlacionados com os resultados dos ensaios de flexão.

Essas propriedades foram determinadas pelo princípio de Arquimedes, utilizando os valores de massa seca (ms), massa imersa (mi) e massa saturada de superfície seca (mss) do material.

Inicialmente, os corpos de prova foram acondicionados em uma estufa a aproximadamente $40^{\circ}\text{C} \pm 1$ durante 48 horas, para secagem, e posteriormente sua ms foi medida em uma balança de precisão. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água por 48h para obtenção da mi. Finalmente, as amostras foram pesadas novamente após sua superfície ser seca para que a mss fosse determinada. A figura 18 apresenta a estufa na qual as amostras secaram.

Figura 18 - Estufa onde os corpos de prova foram acondicionados



Fonte: Autor (2021).

Ao final desse procedimento foi possível obter as propriedades físicas com as seguintes equações:

- Absorção de água (A_a)

$$A_a = \frac{m_{ss} - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

- Densidade aparente (D_a)

$$D_a = \frac{m_s}{m_{ss} - m_i} \quad \text{Eq. 2}$$

- Porosidade aberta (P_a)

$$P_a = \frac{m_{ss} - m_s}{m_{ss} - m_i} * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

m_s = massa seca

m_i = massa imersa

m_{ss} = massa saturada de superfície seca

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

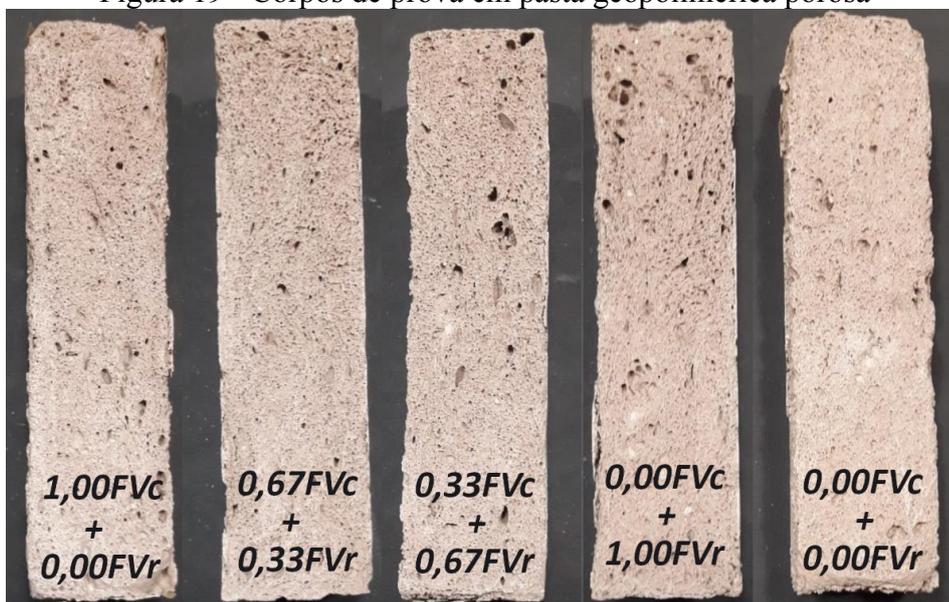
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos de flexão em compressão, assim como da avaliação de propriedades físicas, como densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

4.1. ANÁLISE MORFOLÓGICA

A análise morfológica foi realizada com o intuito de identificar diferenças nos tamanhos e distribuição dos poros nas formulações. Como a quantidade do agente gerador de poros (pó de alumínio) é a mesma em todas as amostras, os poros em todas as amostras se assemelham. As fotos foram realizadas após a cura de 28 dias das amostras.

Nestas fotos (Figura 19) estão presentes as amostras 1,00FVc+0,00FVr, 0,67FVc+0,33FVr, 0,33FVc+0,67FVr, 0,00FVc+1,00FVr (com proporções de fibra de vidro comercial e residual) e 0,00FVc+0,00FVr, sem fibras. Todas as amostras apresentam grande porosidade devido a liberação de gases a partir da oxidação do pó de alumínio. Nas amostras 1,00FVc+0,00FVr, 0,67FVc+0,33FVr, 0,33FVc+0,67FVr e 0,00FVc+1,00FVr é possível observar que os poros estão mais aparentes do que na amostra 0,00FVc+0,00FVr. Isso acontece, pois as fibras de vidro presentes nessas formulações ajudam a manter a estrutura dos poros no interior do corpo de prova, impedindo que ocorra o fenômeno de coalescência dos poros.

Figura 19 - Corpos de prova em pasta geopolimérica porosa

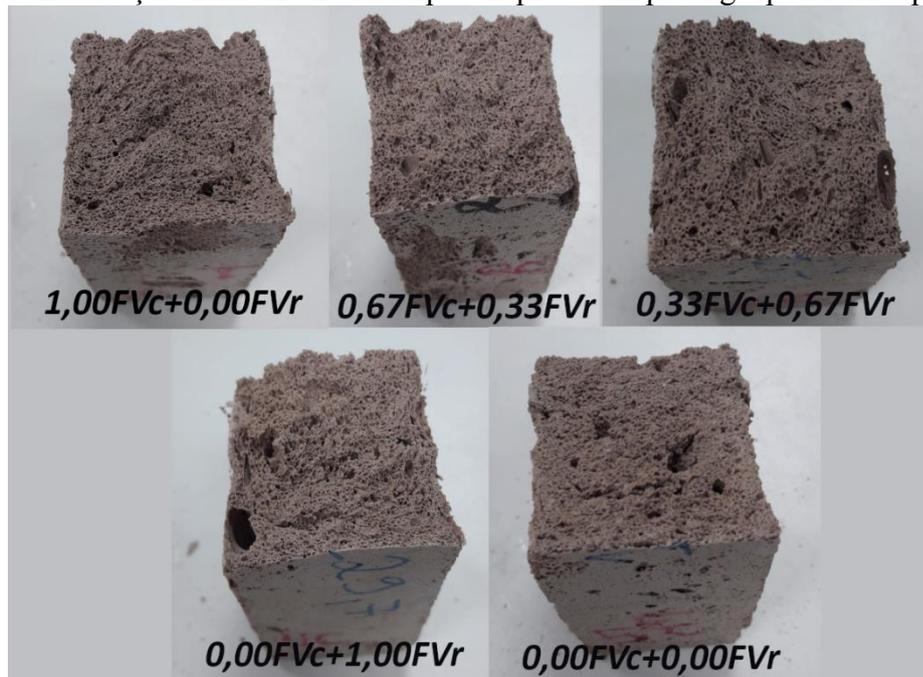


Fonte: Autor (2021).

As seções transversais dos corpos de prova, após rompidos, estão apresentadas na Figura 20. Pode ser observado que a ruptura ocorreu, na maioria dos casos, em pontos onde haviam vazios maiores. Porém, de forma geral, é possível ver que os corpos de prova com fibra de vidro demonstram uma distribuição mais uniforme de poros.

Como já mencionado, as fibras de vidro ajudam na estruturação dos poros e a evitar que os mesmos colapsem, mas também, em alguns casos diminui o crescimento dos poros já que cria um travamento dentro da estrutura.

Figura 20 - Seção transversal dos corpos de prova em pasta geopolimérica porosa



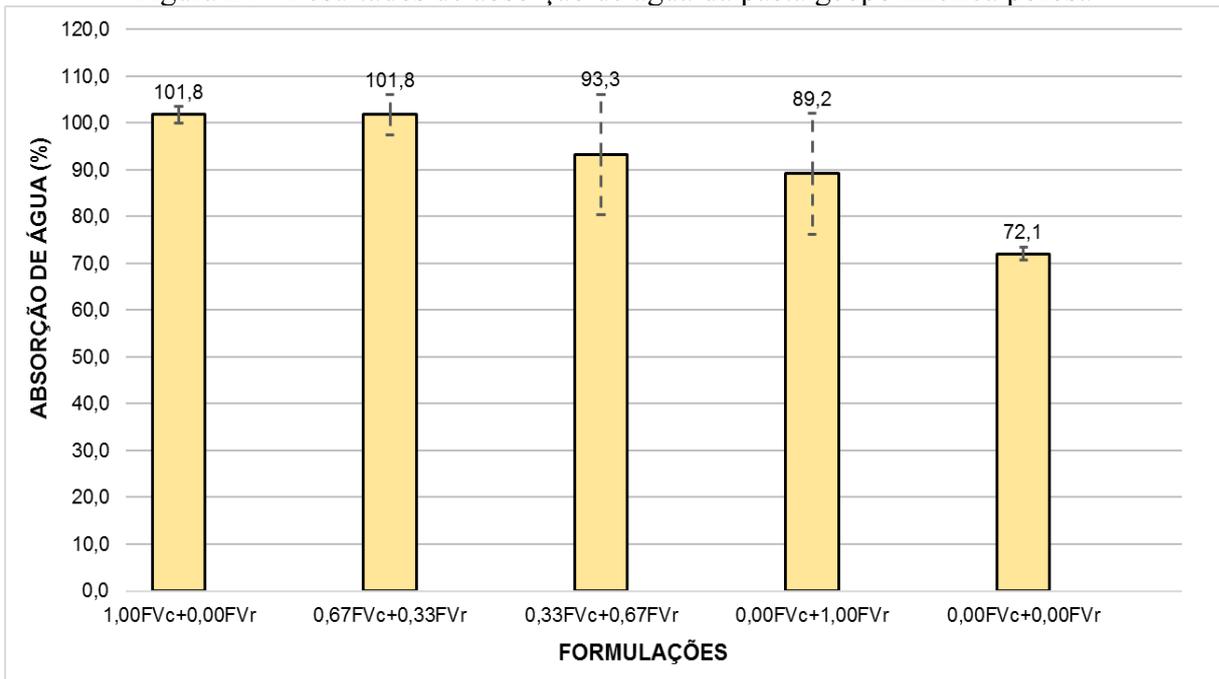
Fonte: Autor (2021).

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS: ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE ABERTA

A Figura 21 apresenta os valores de absorção de água para as formulações. Pode-se constatar que, as formulações com adição de fibra de vidro obtiveram maiores índices de absorção, com as formulações $1,00FVc+0,00FVr$ e $0,67FVc+0,33FVr$ apresentando resultados de absorção maior que 100%.

As formulações $0,33FVc+0,67FVr$ e $0,00FVc+1,00FVr$, com maior quantidade de FV residual tiveram um leve decréscimo na absorção, porém ainda dentro das variações do desvio padrão das demais formulações com FV. E a formulação $0,00FVc+0,00FVr$, teve o índice de absorção de água cerca de 30% menor do que a formulação $1,00FVc+0,00FVr$.

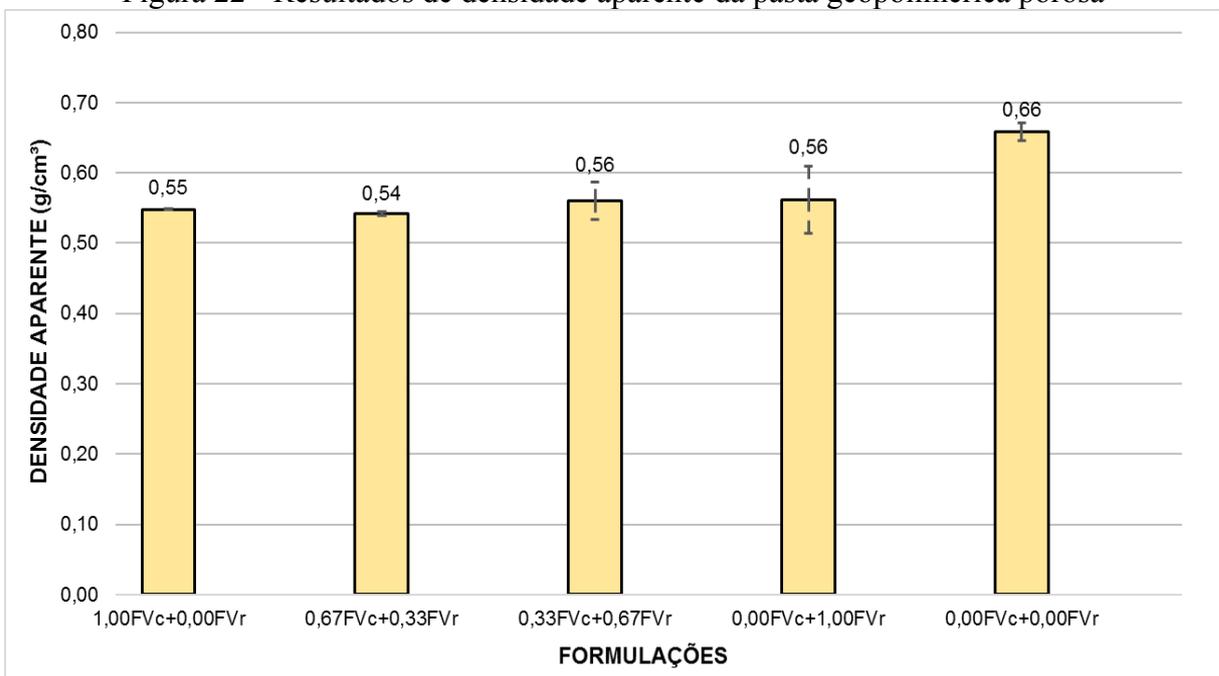
Figura 21 - Resultados de absorção de água da pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

Os valores de densidade aparente (Figura 22), apresentaram resultados esperados, onde as formulações com FV tiveram a densidade menor ao serem comparadas a formulação 0,00FVc+0,00FVr. Como abordado anteriormente, isso ocorre, pois, as FV auxiliam a manutenção dos poros durante a cura inicial, evitando o fenômeno de coalescência.

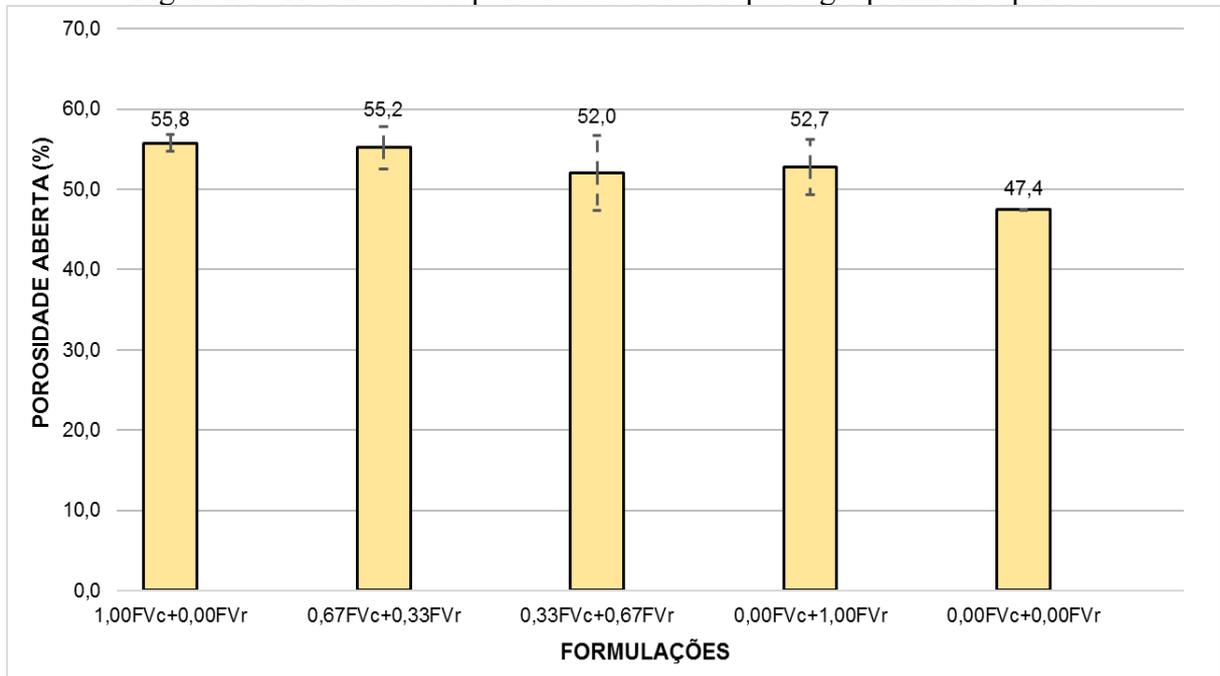
Figura 22 - Resultados de densidade aparente da pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

A redução da densidade, adquirida com a incorporação de FV, foi de aproximadamente 15%. A densidade da formulação 0,00FVc+0,00FVr foi de 0,66 g/cm³ enquanto das formulações 1,00FVc+0,00FVr, 0,67FVc+0,33FVr, 0,33FVc+0,67FVr e 0,00FVc+1,00FVr foram por volta de 0,55 g/cm³

Figura 23 - Resultados de porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa

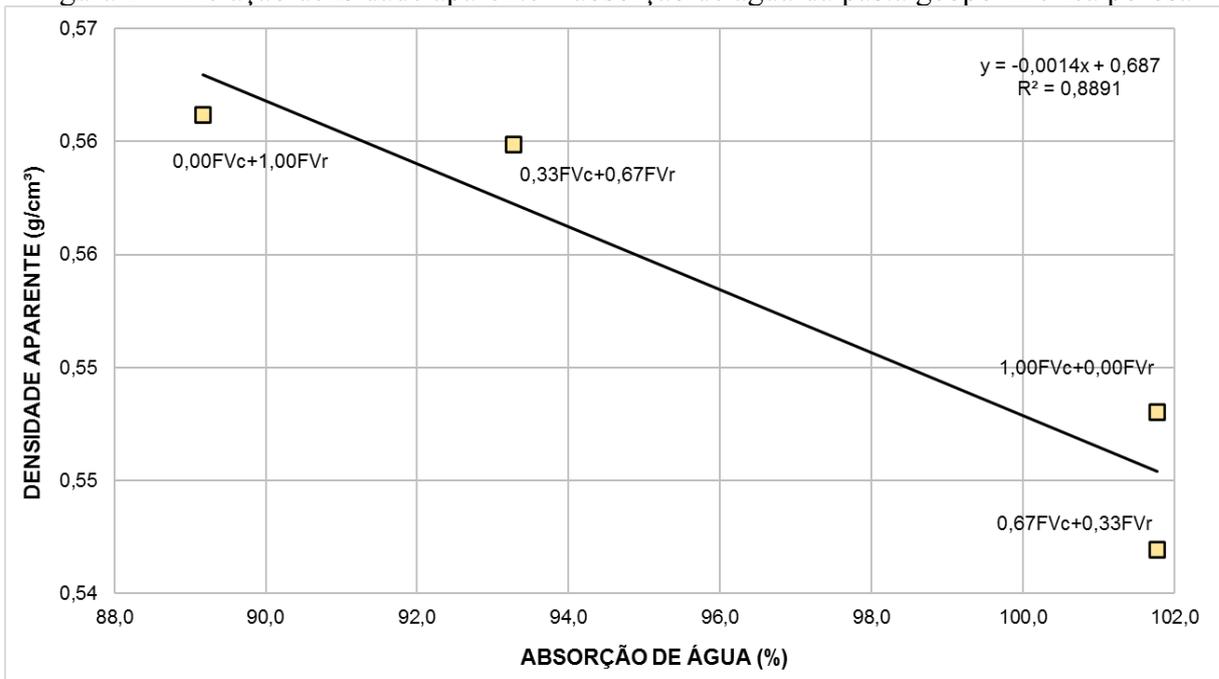


Fonte: Autor (2021).

A porosidade aberta das formulações (Figura 23), novamente como esperado, foi mais elevada nas formulações com FV. Apresentado uma leve queda na porosidade, em comparação às formulações 1,00FVc+0,00FVr e 0,67FVc+0,33FVr, as formulações com quantidades maiores de FV residual (0,33FVc+0,67FVr e 0,00FVc+1,00FVr), ainda assim tiveram porosidade maior que a formulação 0,00FVc+0,00FVr, sem FV.

As Figuras 24, 25 e 26 apresentam gráficos relacionando as propriedades expostas anteriormente de forma individual. Respectivamente, são relacionadas as propriedades de densidade aparente com absorção de água, densidade aparente com porosidade aberta e porosidade aberta com absorção de água. Em ambos os gráficos a tendência foi aproximada por uma linha, com o R² se tendo valores maiores que 0,8.

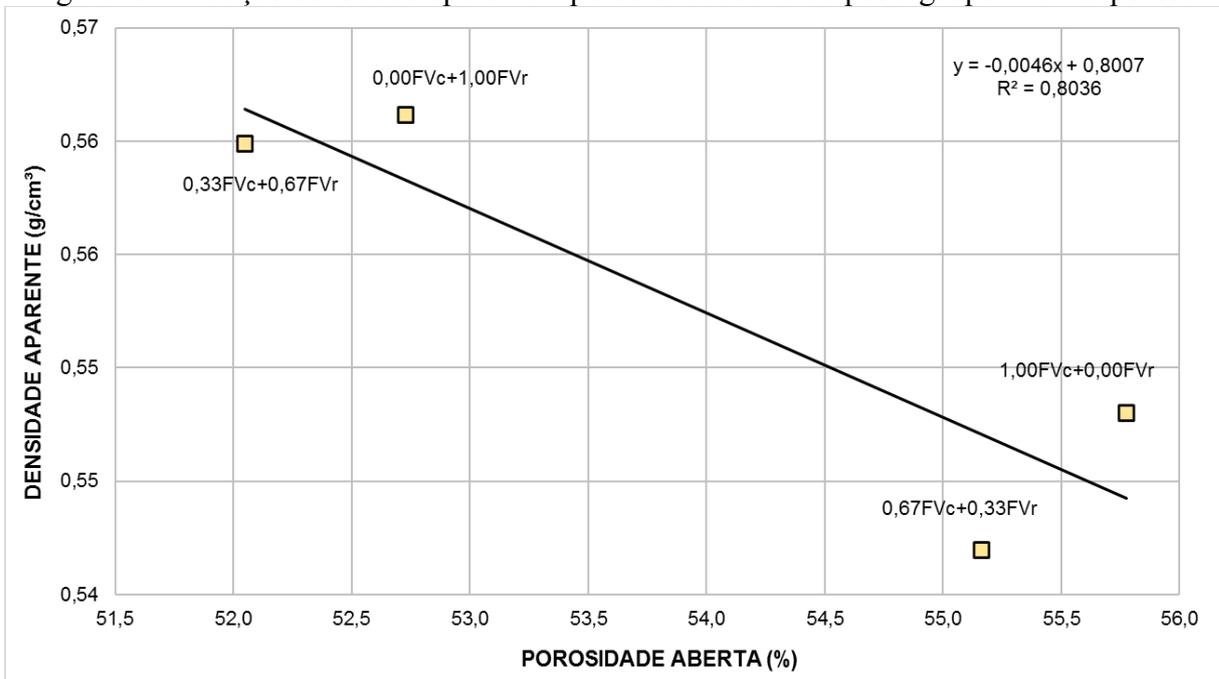
Figura 24 - Relação densidade aparente x absorção de água da pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 24, vê-se que as propriedades densidade aparente e absorção de água são inversamente proporcionais. Portanto, quanto menor a densidade obtida nas formulações, maior é a absorção.

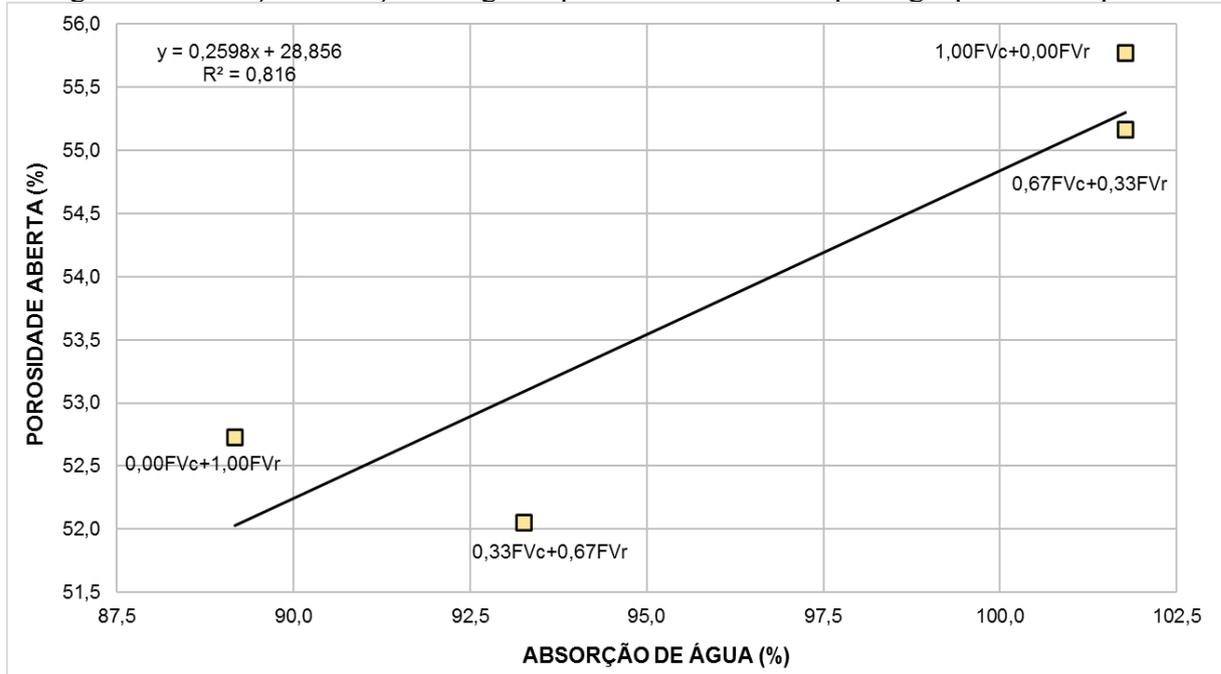
Figura 25 - Relação densidade aparente x porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

A Figura 25 mostra como, igualmente ao que ocorre entre densidade e absorção, a densidade aparente e porosidade aberta também são inversamente proporcionais. Isso demonstra que a menor densidade obtida nas formulações que possuem FV, está relacionada diretamente a quantidade de poros presentes na estrutura, visto que a formulação sem FV (formulação 0,00FVc+0,00FVr) teve a maior densidade e menor percentual de poros.

Figura 26 - Relação absorção de água x porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa



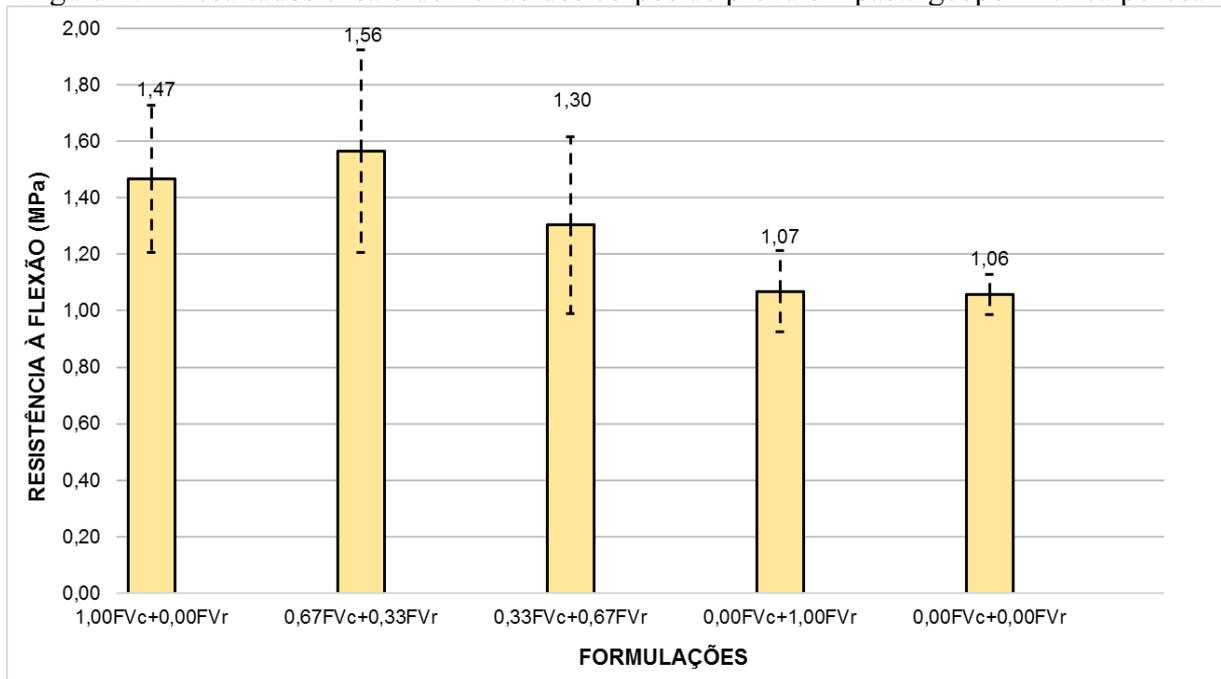
Fonte: Autor (2021).

Finalmente, ao serem relacionadas as propriedades de porosidade aberta e absorção de água (Figura 26), tem-se que essas são propriedades diretamente proporcionais, portanto, quanto maior a porosidade, maior a absorção, resultado demonstrado pela linha de tendência.

4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os resultados dos ensaios de flexão (Figura 27) foram obtidos a partir da média dos ensaios dos 3 corpos de prova de cada formulação. Estes ensaios foram realizados após 28 dias de cura dos corpos de prova.

Figura 27 - Resultados ensaio de flexão dos corpos de prova em pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

Os CPs de referência, formulação 0,00FVc+0,00FVr, obtiveram a menor resistência à flexão, 1,06 MPa, visto que não possuem em sua estrutura as FV para aumentarem sua resistência e minimizar a propagação de trincas.

Como já esperado, com valores de resistência atingindo 1,56 MPa (formulação 0,67FVc+0,33FVr), as formulações que tem FV, seja residual ou comercial, apresentaram resultados melhores de resistência a flexão. Em média as formulações com fibra de vidro obtiveram resultados 38% maiores que a formulação 0,00FVc+0,00FVr.

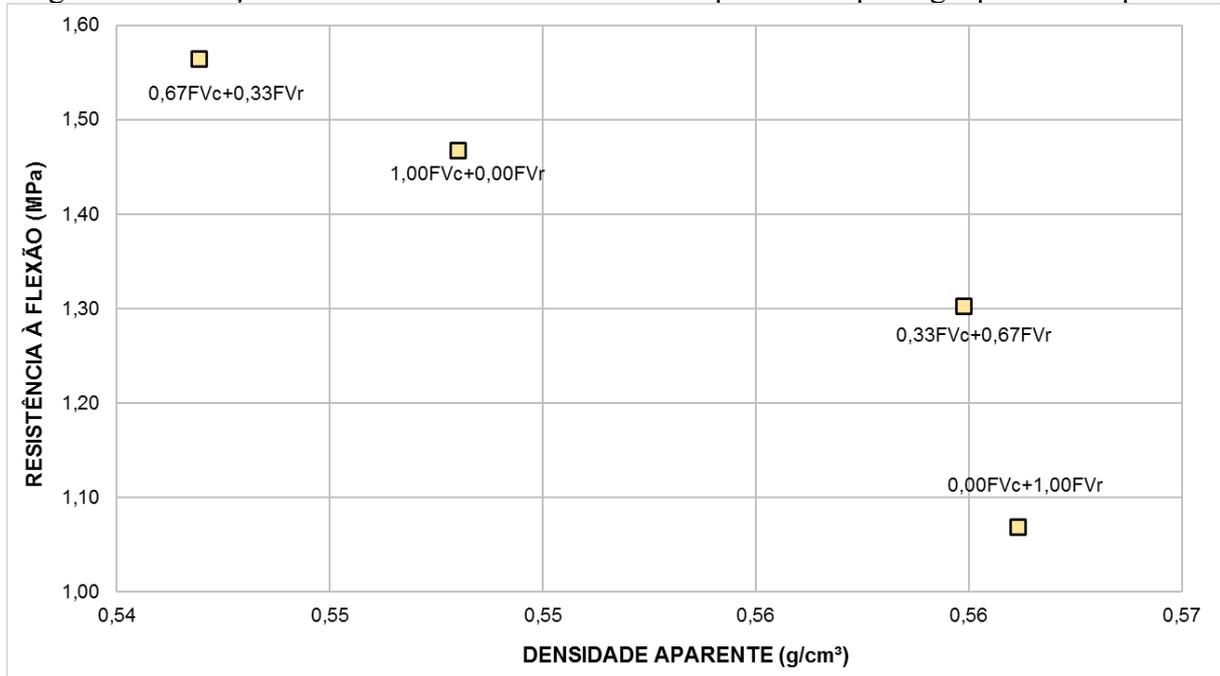
As formulações 1,00FVc+0,00FVr, 0,67FVc+0,33FVr e 0,33FVc+0,67FVr, apresentaram resultados de resistência à flexão aproximados, porém seus desvios padrões foram acentuados. O desvio padrão alto está relacionado à dois fatores principais, primeiro, a dificuldade em garantir que as fibras de vidro fiquem uniformemente distribuídas em toda a estrutura dos corpos de prova e que também estejam posicionadas de forma a auxiliar na resistência ao esforço mecânico. O segundo ponto é a heterogeneidade na estrutura porosa.

A formulação 0,00FVc+1,00FVr, demonstrou comportamento diferente das demais amostras com fibra de vidro, isto está relacionado a falhas na sua estrutura, como o acúmulo de fibra de vidro em determinados pontos e vazios de maior tamanho.

Com o objetivo de entender o impacto da substituição da FV comercial pela residual, nas Figuras 28, 29 e 30, foram relacionadas a resistência a flexão com a densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, respectivamente, excluindo a formulação

0,00FVc+0,00FVr. As linhas de tendencia não foram representativas nesse caso, graças aos resultados de resistência à flexão obtidos com a formulação 0,00FVc+1,00FVr, que como já abordado, foram baixos e fora da expectativa na comparação com as demais formulações com incorporação de fibra de vidro.

Figura 28 - Relação resistência à flexão x densidade aparente da pasta geopolimérica porosa



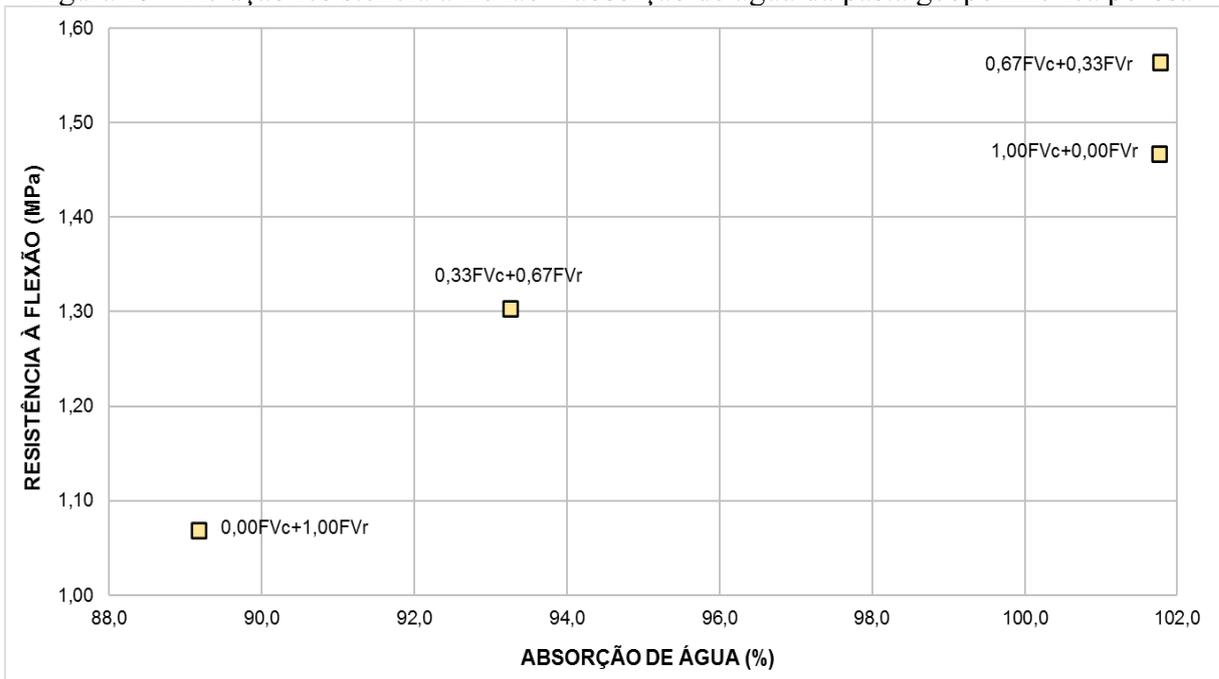
Fonte: Autor (2021).

Assim, na Figura 28, observa-se que, como demonstrado na avaliação das propriedades físicas, as formulações com fibra de vidro tiveram pouca variação na densidade aparente e que, a não ser pela formulação 0,00FVc+1,00FVr, a diferença na resistência à flexão também apresentou pouca variação. A formulação 0,67FVc+0,33FVr teve um acréscimo de apenas 6% na resistência, enquanto a formulação 0,33FVc+0,67FVr, um decréscimo de 11%, ambas em relação a formulação 1,00FVc+0,00FVr.

Assume-se assim que a fibra de vidro residual, quando substituindo a fibra comercial, não afeta de forma relevante, a densidade ou a resistência à flexão das formulações apresentadas.

Para corroborar com os dados apresentados na Figura 28, a Figura 29 mostra a relação entre resistência à flexão e absorção de água. Da mesma forma, vê-se que a absorção de água e a resistência à flexão pouco foram afetadas pela substituição de fibra de vidro comercial pela fibra de vidro residual. Novamente, é possível observar como a formulação 0,00FVc+1,00FVr teve comportamento diferente das demais na resistência a flexão.

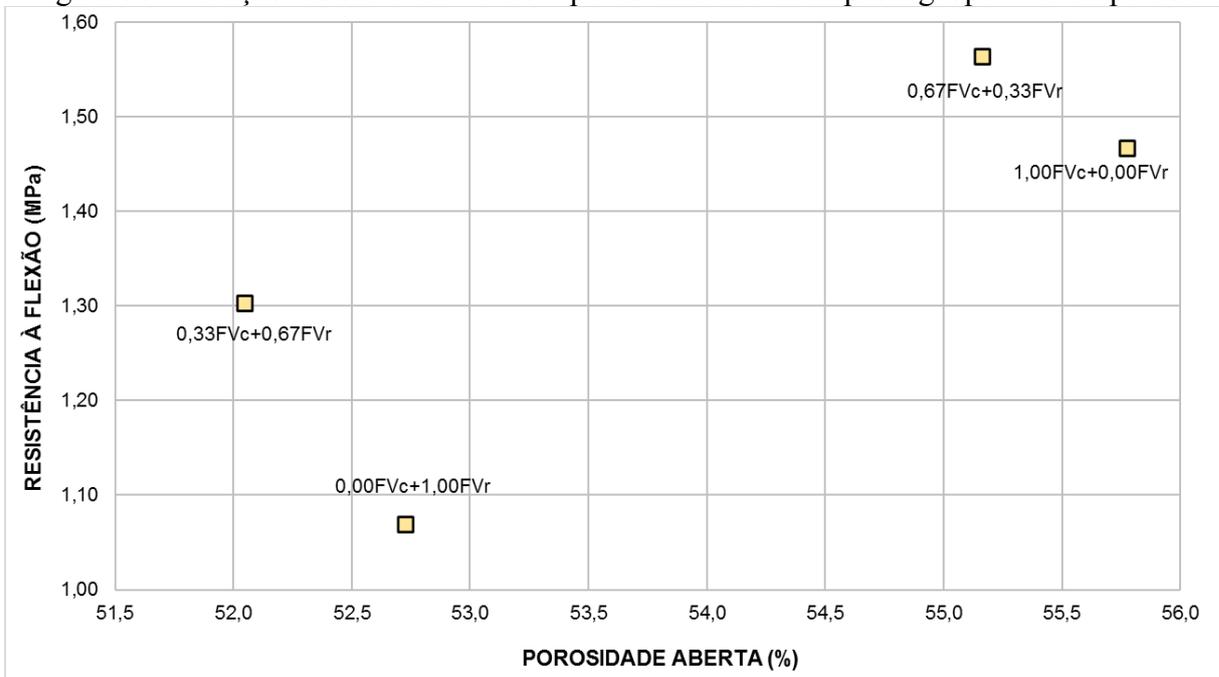
Figura 29 - Relação resistência à flexão x absorção de água da pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

Finalmente, na Figura 30, é apresentada a relação entre resistência à flexão e porosidade aberta. Como seria de se esperar, assim como na relação com a densidade aparente, a porosidade aberta não apresentou grande variação entre essas formulações.

Figura 30 - Relação resistência à flexão x porosidade aberta da pasta geopolimérica porosa



Fonte: Autor (2021).

5. CONCLUSÃO

O objetivo do estudo realizado foi avaliar os impactos da substituição de fibras de vidro comerciais por fibras de vidro residuais, com origem na indústria, em uma matriz geopolimérica porosa, para justificar, ou não, a viabilidade dessa substituição.

Foram produzidas cinco formulações em pasta geopolimérica porosa, das quais em quatro delas foi adicionado 1% da massa da formulação, em FV. A fibra de vidro comercial foi gradualmente substituída por FV residual nas formulações, em teores de 0%, 33%, 67% e 100%. E esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão e de avaliação de absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta.

A adição de fibra de vidro, tanto residual quanto comercial, gerou diminuição de até 20% na densidade e aumento na porosidade e absorção de água, em comparação uma formulação sem fibra de vidro, mas de mesma composição. Isso ocorreu, pois a fibra de vidro auxilia na estruturação e manutenção dos vazios durante o estado fresco, diminuindo a chance de coalescência e achatamento dos poros.

Notou-se, também, que todas as formulações que continham FV residual ou comercial apresentaram resultados de densidade, porosidade e absorção de água muito próximos, por volta de 0,56 g/cm³, 55% e 100%, respectivamente. Esses resultados mostram como a substituição não alterou essas propriedades físicas, de forma relevante.

Os resultados de resistência à flexão apontam que, mesmo com maior densidade, os corpos de prova sem FV obtiveram resultados até 47% inferiores aos que as tinham em sua composição. A resistência à flexão dos corpos de prova sem fibra de vidro atingiu em torno de 1,06 MPa, enquanto os que tinham fibra de vidro alcançaram até 1,56 MPa. Quando comparados entre si, as formulações que continham FV tiveram pequenas variações, independente dos teores substituídos.

Vale ressaltar ainda que nos ensaios de resistência à flexão, alguns corpos de prova ensaiados apresentaram grande variabilidade dos resultados, que pode ter sido ocasionada pela dificuldade na distribuição uniforme da fibra de vidro na pasta, pelo posicionamento aleatório das fibras ou por heterogeneidades de tamanho e forma dos vazios.

Contudo, a partir dos resultados obtidos nesse estudo, pode-se afirmar que essa substituição seria viável. O uso da FV residual, na matriz geopolimérica porosa, manteve os resultados, proporcionados pela FV comercial, em resistência a flexão, absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta, aos 28 dias, além de ser uma alternativa com mais sustentável.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência da substituição da fibra de vidro comercial pela residual nas propriedades no estado fresco;
- Avaliar a influência da substituição da fibra de vidro comercial pela residual em propriedades além das estudadas nesse trabalho (durabilidade, por exemplo);
- Avaliar a influência da substituição da fibra de vidro comercial pela residual nas propriedades mecânicas e físicas em outros teores;
- Variar molaridade em formulações com fibra de vidro residual;
- Variar a granulometria do pó de alumínio em formulações com fibra de vidro residual;
- Variar os comprimentos e espessuras dos filamentos, com o intuito de verificar se a influência da substituição é a mesma para diferentes comprimentos de fibras;

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, R. A. et al. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1166–1175, 2010.
- ANDRADE, B. D. **Estudo da obtenção de geopolímero a partir de aluminossilicato sintetizado via sol-gel**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- ARAUJO, D. G. **Desenvolvimento de compósito de policloreto de vinila (PVC) reforçado com fibra de vidro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.
- BAI, C.; COLOMBO, P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: a review. **Ceramics International**, v. 44, n. 14 p. 16103-16118, 2018.
- BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- BOCA SANTA, R. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- CILLA, M. S. **Highly porous geopolymers: effect of the processing route on the reached properties**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais e Engenharia) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- DAVIDOVITS J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p. 1633-1656, 1991.
- DAVIDOVITS, J. **30 Years of successes and failures in geopolymer applications**. market trends and potential breakthroughs. Geopolymer institute. Geopolymer. Melbourne, Australia: Conference, 2002.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer cement a review. **Geopolymer Science and Technics**, v. 21, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, França, 2013.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions. Geopolymer Institute, Saint-Quentin, França, 2005. Versão online. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=wIFo7L_zO8AC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 17 jun. 2020.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In: First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials. **Anais [...]** Kiev State Technical University, Kiev, Ucrânia, 1994.

FENG, D.; PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Thermal activation of albite for the synthesis of one-part mix geopolymers. **Journal American Ceramic Society**, v. 95, n. 2, p. 565-572, 2012.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). About cement and concrete: key facts. 2020. Disponível em: <https://gccassociation.org/key-facts/>. Acesso em: 07 abr. 2020.

GRIZZO, L. H. **Desenvolvimento de concentrados de pvc reforçados com fibra de vidro longas (lf-pvc) para reforçar compostos de pvc rígido moldados por injeção**. 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

HAGEMANN, S. E. **Materiais de construção básicos**. 2011. Trabalho Acadêmico (Graduação) – Campus Pelotas, Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Pelotas, 2011. (mimeo).

HARTMANN, E. **Argamassa geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). Desafios na reciclagem. 2010. Disponível em: https://www.ipt.br/noticia/183-desafios_na_reciclagem.htm. Acesso em: 28 jul. 2020.

LUZ, A. B. et al. **Caulim**. 2009. Trabalho Acadêmico (Graduação) – Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, P. 255-294, 2009.

MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v. 24, n. 2, p. 79–87, 2009.

MÁRTIRES, R. A. C. **Caulim**. Belém: DNPM 5º DS/DNPM, P. 474-483, 2009.

MASI, G. et al. A comparison between different foaming methods for the synthesis of lightweight geopolymers. **Ceramics International**, v. 40, p. 13891-13902, 2014.

MOTEZUKI, J. E. **Influência da nanoargila no envelhecimento higrotérmico de compósitos de polipropileno / PP maleado / fibra de vidro**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

NOVAIS, R. M. et al. Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 343–349, 2017.

NOVAIS, R. M. et al. Influence of blowing agent on the fresh - and hardened-state properties of lightweight geopolymers. **Materials and Design**, v. 108, p. 551–559, 2016b.

NOVAIS, R. M. et al. Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity. **Journal of Cleaner Production**, v. xxx, p. 1–9, 2016a.

OSÓRIO, P. D. L. **Concepção de um saferoom anti-tornado em betão geopolimérico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Do Minho, Guimarães, Portugal, 2006.

PINTO, A.T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Vila Real: Universidade De Trás-Os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2006.

PINTO, A.T. **Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do Metacaulino**. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009.

SENF, L. et al. Eco-friendly approach to enhance the mechanical performance of geopolymer foams: using glass fibre waste coming from wind blade production. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 1–11, 2020.

SILVA, A. C. R. **Comportamento do concreto geopolimérico para pavimento sob carregamento cíclico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, C. A. O. et al. Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado. **Revista Matéria**, v. 23, n 1, 2018.

SILVA, S. P. **Balanço mineral brasileiro 2001 (Caulim)**, Belém: DNPM 5° DS/DNPM, 2001.

SKAF, T. B. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

SONAFRANK, G. H. C. Investigating century cement production. **Cold Climate**. Housing Research Center (CCHRC). Alaska, p.114, 2010.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

WEERDT, K. D. Geopolymers: State of the art. **Coin Project report**, 37-2011, 2011. Disponível em: <https://www.sintefbok.no/book/index/1018>. Acesso em: 16 nov. 2020.